



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE BACHARELADO EM GEOGRAFIA

ALEXANDRO MEDEIROS SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
COBERTURA DO SOLO E DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA
BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI - PB

João Pessoa-PB

Agosto de 2014

ALEXANDRO MEDEIROS SILVA

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
COBERTURA DO SOLO E DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA
BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI - PB**

Monografia apresentada ao Departamento de Geociências do Centro de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade Federal da Paraíba - *Campus* I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa-PB

Agosto de 2014

S586a Silva, Alexandre Medeiros.

Análise da viabilidade de espaço-temporal da cobertura do solo e de parâmetros biofísicos na bacia experimental de São João do Cariri, PB / Alexandre Medeiros Silva. – João Pessoa, 2014.

57p. : il.

Monografia (Bacharelado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

1. Sensoriamento remoto. 2. Uso e ocupação do solo.
3. Algoritmo SEBAL. 4. Parâmetro biofísico - São João do Cariri, PB.

Dedico esse trabalho em especial à minha família, os quais não mediram esforços para que eu conseguisse concluir essa etapa e com isso possa alcançar todos os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família em especial aos meus pais, Maria Salete Medeiros Silva e Sérgio Antônio da Silva, e ao meu irmão, Leandro Medeiros que sempre me ajudaram ao longo dos quatros anos da graduação prestando todo o suporte que estava ao seu alcance e que sem dúvidas não teria conseguido concluir essa etapa da minha vida sem a ajuda deles.

Agradeço também ao Professor Dr. Richarde Marques da Silva, coordenador do Laboratório de Ensino, Projetos e Pesquisas em Análises Espaciais (LEPPAN), o qual me deu a oportunidade de integrar por mais de dois anos a equipe do laboratório, onde pude ter contato com diversos projetos de pesquisa, que me deram suporte para concluir a graduação, bem como, almejar seguir a carreira acadêmica.

Não poderia deixar de agradecer a todos os meus amigos que fizeram parte de toda a minha graduação, em especial a Camila Gouveia, Jeferson da Silva Chaves, Raísa Maria Regala, Paulo Roberto Pereira da Silva, Geraldo Almeida, Lindemberg Albuquerque, Darla Simplicio e Amanda Arcanjo.

A todos os integrantes do LEPPAN, principalmente, a Isabella Carvalho de Medeiros e Ana Paula Campos Xavier, as quais foram minhas amigas e parceiras de trabalhos desde os primeiros artigos escritos, agradeço também a Julyanne Barbosa e José Carlos Dantas e aos demais integrantes do laboratório por toda a ajuda.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente do curso de Geografia que colaboraram com todo o conhecimento adquirido ao longo dos quatro anos de curso.

“A fê na VITÓRIA tem que ser INABALÁVEL”

(Anjos – O Rappa)

RESUMO

Esse estudo teve como objetivo analisar as variações espaço-temporais do uso e ocupação do solo e de parâmetros biofísicos em uma porção do semiárido da Paraíba. Além disso, visa também estudar o comportamento da evapotranspiração diária nos diferentes tipos de uso e ocupação do solo da região. Os dados observados foram coletados na estação climatológica localizada na Bacia Experimental de São João do Cariri, situada na região semiárida do Estado da Paraíba. Esse trabalho comparou dados observados de temperatura do solo em três profundidades (2, 5 e 10 cm), comparando com dados estimados pelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL usando 12 imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM), do satélite LANDSAT 5. Dessas imagens, duas sem cobertura de nuvens das datas 17/12/2004 e 28/10/2009, foram utilizadas para o mapeamento do uso e ocupação do solo, da distribuição dos parâmetros biofísicos e da evapotranspiração. Os resultados mostram que houve correlação de 0,61 entre as temperaturas estimadas e as observadas a 5 cm de profundidade. Os valores médios de T_s apresentaram um aumento de 2°C, para o saldo de radiação (R_n) as médias variaram entre 635,3 W/m² e 817,8 W/m², já a evapotranspiração apresentou uma diminuição no seu valor médio, passando de 4,39 mm/dia para 1,96 mm/dia. Conclui-se que a determinação de T_s , R_n e evapotranspiração de diferentes usos do solo na área de estudo alcançaram valores muito consistentes, mostrando-se uma metodologia satisfatória quando comparado com observações realizadas em campo.

Palavras chave: Sensoriamento Remoto, SIG, SEBAL, Semiárido.

ABSTRACT

This study aims to analyze the spatiotemporal variations of use and land cover and biophysical parameters in the semiarid of Paraíba State. Moreover, also aims to study the behavior of daily evapotranspiration in different types of uses and land use in the region. The observed data were collected at the meteorological station located at the Experimental Basin of São João do Cariri, located in the semiarid region of Paraíba State. This study compared data observed surface temperature (T_s) at three depths (2, 5 and 10 cm) compared to data estimated by the Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL using 12 sensor images Thematic Mapper (TM) satellite LANDSAT 5. These images, two without cloud cover for the dates of 17/12/2004 and 28/10/2009 were used to mapping different types of uses and land use, of biophysical parameters and ET. The results showed that there was a correlation of 0.61 between the estimated and the observed temperatures 5cm deep. The mean values of T_s increased by 2 °C, for net radiation (R_n) the means ranged from 635.3 W/m² and 817.8 W/m², as evapotranspiration showed a decrease in their average value, from 4.39 mm/day to 1.96 mm/day. It is concluded that the methodology used in the determination of T_s , R_n and evapotranspiration in the selected areas, achieved very consistent values, showing a satisfactory methodology. The algorithm SEBAL determined, satisfactorily, the values of T_s , R_n and ET on study area, consistent with observations made in the field.

Keywords: Remote Sensing, GIS, SEBAL, semiarid.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica da Bacia Experimental de São João do Cariri.....	18
Figura 2. Precipitação anual na Bacia Experimental de São João do Cariri.	19
Figura 3. Tipos de solo da Bacia Experimental de São João do Cariri.	20
Figura 4. Declividade da Bacia Experimental de São João do Cariri.	22
Figura 5. Fluxograma das etapas para obtenção da evapotranspiração.....	25
Figura 6. Fluxograma do processo iterativo do SEBAL, para determinação da evapotranspiração diária.	33
Figura 7. Classificação do uso e ocupação do solo da Bacia Experimental de São João do Cariri para as datas de 17/12/2004 (a) e 28/10/2009 (b).	37
Figura 8. Variabilidade sazonal da temperatura do solo entre 2004 e 2010 nas três profundidades analisadas (2 cm, 5 cm e 10 cm).....	39
Figura 9. Parâmetros estatísticos da variabilidade dos dados de T_s observados e estimados	40
Figura 10. Comparação entre as temperaturas estimadas pelo SEBAL e as observadas nas profundidades de: (a) 2 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm e (d) média.....	40
Figura 11. Mapa de albedo à superfície na Bacia Experimental de São João do Cariri para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.....	42
Figura 12. Mapas de NDVI da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.....	43
Figura 13. Distribuição espacial dos valores de SAVI da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	43
Figura 14. Espacialização dos valores de IAF da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	44
Figura 15. Histogramas dos índices de vegetação calculados para a Bacia Experimental de São João do Cariri: (a) NDVI, (b) SAVI e (c) IAF.....	45
Figura 16. Mapas de temperatura de superfície da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	47
Figura 17. Mapas do saldo de radiação à superfície na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	48
Figura 18. Mapas de fluxo de calor no solo na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	49
Figura 19. Mapas da evapotranspiração na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área dos tipos de solo.....	20
Tabela 2. Classes de declividade	22
Tabela 3. Informações das Imagens TM Landsat-5.....	23
Tabela 4. Características e coeficientes de calibração das Imagens TM Landsat-5	24
Tabela 5. Áreas das classes de uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de São João do Cariri.	38
Tabela 6. Diferença entre as 5emperaturas estimadas e observadas	39
Tabela 7. Valores dos índices de vegetação da área de estudo.....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Descrição da Área de Estudo	18
3.2 Aquisição das Imagens de Satélite.....	23
3.3 Classificação das imagens de satélite	24
3.4 Aplicação do Algoritmo SEBAL.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 Estudo da evolução do uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de São João do Cariri	37
4.2 Análise do desempenho do algoritmo SEBAL na estimativa da temperatura de superfície em comparação com dados observados em campo.....	38
4.3 Estimativa dos parâmetros biofísicos na Bacia Experimental de São João do Cariri	41
4.4 Determinação da evapotranspiração diária para a Bacia Experimental de São João do Cariri.	50
5. CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente disponibilização de imagens orbitais de baixa e alta resolução espacial, trabalhos que se utilizam desses produtos são cada vez mais comuns no cenário acadêmico mundial. Por se tratar de técnicas de baixo custo, o uso de imagens de satélites vem sendo aplicadas com diversas finalidades, dentre elas, mapeamento da evolução do uso e ocupação do solo (SILVA et al., 2013), determinação de parâmetros biofísicos (RODRIGUES et al., 2009), e perdas de solo (XAVIER et al., 2013).

Em paralelo aos sensores remotos, surgem também vários algoritmos computacionais que tem como base as imagens de satélite, dos quais podemos destacar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), que utilizam imagens orbitais e dados observados em estações climatológicas (temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica) para o cálculo de diversos parâmetros biofísicos (albedo de superfície, índices de vegetação, temperatura de superfície e saldo de radiação) e evapotranspiração (BORGES, 2013).

As aplicações destas técnicas que envolvem sensoriamento remoto em bacias hidrográficas possuem uma grande relevância, pois o conhecimento das informações sobre o uso e ocupação do solo, bem como de seus parâmetros biofísicos (NDVI, SAVI, LAI, albedo, temperatura do solo e saldo de radiação) e a evapotranspiração, são de suma importância estratégica para a gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, sobretudo quando essas informações podem estar integradas em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

A determinação de parâmetros biofísicos utilizando imagens de satélite em ambiente SIG permite a integração e atualização de bases geográficas, que auxiliam na tomada de decisão, sobretudo na produção de mapas temáticos e no auxílio de análises espaciais, através do cruzamento de imagens de sensores remotos, dados tabulares e de informações geográficas.

Assim, a execução desse estudo para a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), que está inserida no bioma Caatinga, busca mapear as alterações ocorridas na cobertura do solo no decorrer do tempo e analisar até que ponto essas mudanças no uso e ocupação do solo podem acarretar alterações no comportamento dos parâmetros biofísicos da bacia, tendo em vista, possibilitar que os resultados da

pesquisa possam ser utilizados como base em estudos sobre manejo de bacias hidrográficas e na determinação dos parâmetros biofísicos para diferentes usos do solo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a variação espaço-temporal do uso e ocupação do solo e de parâmetros biofísicos estimados pelo SEBAL na Bacia experimental de São João do Cariri.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a evolução do uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de São João do Cariri no período de 2004 - 2009;
- Determinar valores de parâmetros biofísicos para a área de estudo;
- Comparar o desempenho do algoritmo SEBAL na estimativa da temperatura de superfície com dados observados em campo;
- Estimar a evapotranspiração diária para a área de estudo;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Sensoriamento Remoto é uma das tecnologias que apresentou grande evolução da qualidade dos seus produtos, bem como das suas aplicações, seja na iniciativa privada, em órgãos públicos ou em estudos acadêmicos, por se mostrar uma ferramenta de baixo custo e que permite a execução de estudos em larga escala.

Meneses e Almeida (2012) definem de forma genérica o Sensoriamento Remoto como sendo “uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto”. Contudo os mesmos autores dizem que “Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações eletromagnéticas com os materiais terrestres”, portanto, imagens obtidas por sensores que não detectem radiação eletromagnética (REM) não podem ser considerados como produto de Sensoriamento Remoto.

Outra definição de Sensoriamento Remoto que corrobora com a definição supracitada, é a de Florenzano (2011), que define o Sensoriamento Remoto como sendo “A tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, por meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície”. Esse conceito de Florenzano considera como produtos do Sensoriamento Remoto, tabelas e gráficos, por exemplo, oriundos de espectro radiômetros.

Com a evolução na resolução espacial dos produtos dos sensores remotos imageadores e a disponibilização por meio da internet, por exemplo, permitiu que imagens de satélites, sejam aplicadas para diversas finalidades como: monitoramento ambiental, elaboração de mapas temáticos, levantamento de recursos naturais, dentre diversas outras aplicações.

Para a melhor utilização das imagens de satélite, faz-se praticamente indispensável o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), definido por Fitz (2008) como:

um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados especialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido.

Nos últimos anos, técnicas de Sensoriamento Remoto têm assumido grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais,

pois oferecem grande suporte às previsões de tempo e um melhor entendimento do comportamento de variáveis climáticas e de parâmetros biofísicos da superfície terrestre, como: temperatura da superfície, fluxo de calor no solo, balanço de energia e evapotranspiração.

A principal vantagem do Sensoriamento Remoto é a geração de informações de grandes e pequenas áreas com diferentes resoluções espaciais e temporais. Com o advento dessa técnica tornou-se possível o monitoramento espaço-temporal dos recursos hídricos e do uso do solo, em diferentes biomas (SANTOS et al., 2014).

A obtenção de informações climatológicas por meio de imagens orbitais propicia a análise de amplas áreas da superfície terrestre quando comparadas com a coleta de dados pontuais disponibilizados por estações climatológicas, sobretudo em regiões com escassez de dados climatológicos, como é o caso da porção semiárida do Nordeste do Brasil.

Atualmente, diversos sensores a bordo de satélites ambientais, a exemplo do *Thematic Mapper* no Landsat 5, *Enhanced Thematic Mapper* no Landsat 7, AVHRR no NOAA, MODIS no Terra/Aqua, dentre inúmeros outros, medem a radiação solar refletida e/ou emitida por alvos na superfície, o que propicia o cômputo de sua refletividade em diferentes faixas do espectro eletromagnético e também da temperatura da superfície (GOMES et al., 2009).

A união dessas refletâncias compõe diversos índices biofísicos que são indicadores importantes da presença e vigor da vegetação. Assim, índices de vegetação e a temperatura da superfície são importantes componentes do saldo de radiação na superfície e o seu monitoramento permite a identificação de mudanças no uso do solo, com consequências importantes para o ambiente e o clima em escala regional, sobretudo, no comportamento da evapotranspiração (MENDONÇA et al., 2012).

Nesse sentido, o conhecimento do comportamento de parâmetros biofísicos em diversos usos do solo em escala regional ou global são informações de entrada importantes para modelos do tipo *Soil Vegetation Atmosphere Transfer scheme* – SVATs. A elaboração e a validação de modelos SVATs, para determinação dos fluxos de energia e umidade entre o solo, a vegetação e a atmosfera, tem sido um importante objeto de investigação científica (DASH et al., 2002).

O *International Geosphere-Biosphere Program* – IGBP, por exemplo, tem incentivado a realização de diversos estudos internacionais para melhorar o conhecimento da interação entre o solo e a atmosfera. O HAPEX-MOBILHY, em

região temperada da França, o ABRACOS, na Amazônia, o BOREAL, no Canadá, e o HAPEX SAHEL, na zona do Sahel, no Oeste Africano, são exemplos de projetos dessa natureza (SILANS et al., 2008).

Existem vários algoritmos para se estimar parâmetros biofísicos da superfície da terra a partir de imagens orbitais. Segundo Trezza et al. (2013), um bom algoritmo para determinar a temperatura de superfície depende, dentre outros fatores de: (a) avaliação dos efeitos da atmosfera; (b) estimativa da emissividade; (c) qualidade do sensor do infravermelho termal incluindo a estabilidade da função resposta espectral, e (d) resolução radiométrica do satélite.

Dentre os algoritmos que fazem uso de imagens de satélite, o mais utilizado em todo o planeta é o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen et al. (1998). Esse algoritmo tem sido aplicado e validado em diversos países, como Estados Unidos, China, Egito, Espanha, Argentina, Índia, Brasil, entre outros, conforme apresentado nos estudos de Bastiaanssen (2000), Tasumi (2003), e Bastiaanssen e Chandrapala (2003). No Brasil, podem ser destacados os trabalhos de Bezerra et al. (2008), Silva et al. (2011), Teixeira et al. (2009a) e Teixeira et al. (2009b).

Esse algoritmo é um modelo semi-empírico, que fornece os componentes do balanço de energia e consequentemente a evapotranspiração. Para sua execução se faz necessário apenas imagens de satélite e um pequeno conjunto de informações climáticas, e dentre seus principais produtos estão: albedo de superfície, índices de vegetação, temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e a evapotranspiração diária (UDA, 2013; BORGES, 2013).

Alguns dos parâmetros gerados pelo SEBAL possuem grande relevância para o manejo de bacias hidrográficas como, por exemplo, o albedo de superfície e o NDVI, que são ótimos indicadores de mudanças na cobertura de uma bacia hidrográfica, uma vez que variam de acordo com o tipo da cobertura do solo e sua composição químico-física, que recebe a radiação eletromagnética (SILVA et al., 2005). A evapotranspiração, que é apontada por Borges (2013) como sendo um dos principais componentes do ciclo hidrológico, e o seu valor integrado no tempo é de suma importância para estudos hidrológicos, agrônômicos e de modelagem atmosférica.

Inicialmente, as aplicações mais comuns do SEBAL são para regiões relativamente planas e com perímetro irrigado, como apontam os estudos de Oliveira et al. (2013), que mapearam o saldo de radiação à superfície em áreas de cana-de-açúcar

no Estado de São Paulo. Nesse trabalho as variáveis estimadas pelo SEBAL mostraram boas respostas das alterações biofísicas e pluviométricas dos dias anteriores a obtenção das imagens, além de obter valores que condizem com estudos prévios em áreas com a mesma cultura.

Bezerra et al. (2012) aplicaram o SEBAL para a obtenção da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do algodoeiro irrigado, no município de Bom Jesus da Lapa-BA, sendo possível verificar que o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) mostrou ser uma ferramenta importante para o manejo e estimativa da cultura, já que as alterações dos seus valores é um bom indicador do desenvolvimento do algodoeiro.

Contudo a aplicação do algoritmo SEBAL para áreas que possuem certa irregularidade topográfica, como no caso de algumas bacias hidrográficas, vem se tornando cada vez mais comum, porém faz-se necessário o uso de algumas correções, e para isso foi desenvolvido o “SEBAL – *Mountain Model*”, que necessita de informações de declividade e altitude para cada pixel, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), assim como aponta Menezes et al. (2009).

Menezes et al. (2009), aplicaram o SEBAL para condições de relevo montanhoso no município de Santa Bárbara – MG, e apontaram que os valores obtidos para essas condições de relevo devem ser acompanhados de validações e calibrações, já que os resultados alcançados superestimaram os valores encontrados quando a mesma área foi admitida como sendo relativamente plana.

No estudo desenvolvido por Di Pace et al. (2008), para uma região de perímetro irrigado e de vegetação nativa, entre a Bahia e Pernambuco, também foi observado que a utilização do MDE, causa alterações consideráveis nos valores do balanço de energia, se comparado com a utilização do modelo sem o MDE.

Ainda são escassos os estudos sobre esses parâmetros nos usos do solo típicos do bioma Caatinga (MACHADO et al., 2014). De acordo com Silans e Silva (2007), apesar da importância do bioma representado pela Caatinga, que abrange todos os estados da região Nordeste, poucos estudos experimentais têm sido desenvolvidos no sentido de se compreender os fenômenos associados às transferências de calor e massa nessa região, e, conseqüentemente, de temperatura da superfície, saldo de radiação e evapotranspiração, sobretudo comparados com dados observados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área de Estudo

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) possui uma área de aproximadamente 13,5 km² e está localizada entre as coordenadas de 36° 31' 01" E a 36° 33' 32" e de 7° 20' 27" S a 7° 23' 24" S (Figura 1). Esta bacia está inserida no bioma Caatinga, na unidade geoambiental do Planalto da Borborema. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo BSh (semiárido), caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. A temperatura ao longo do ano varia entre 24 °C (mínima) no mês de junho e 29 °C (máxima) nos meses de setembro a janeiro, e a umidade relativa média anual é de aproximadamente 57% (SANTOS et al., 2007). A Figura 2 mostra a variabilidade da precipitação anual média na bacia Experimental de São João do Cariri, no período de 1987 a 2010, obtidos na estação climatológica instalada na bacia, nas coordenadas 36° 31' 37" O e 7° 22' 65" S. Percebe-se que a precipitação anual foi em torno de 460 mm.

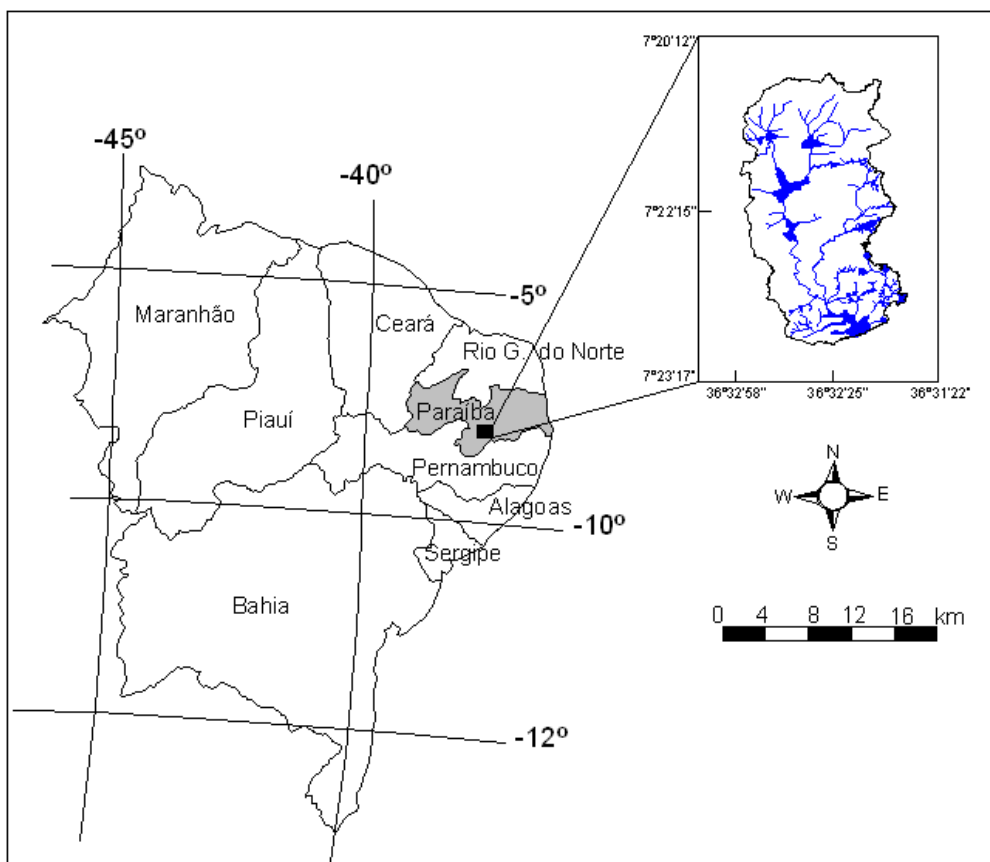


Figura 1. Localização geográfica da Bacia Experimental de São João do Cariri.

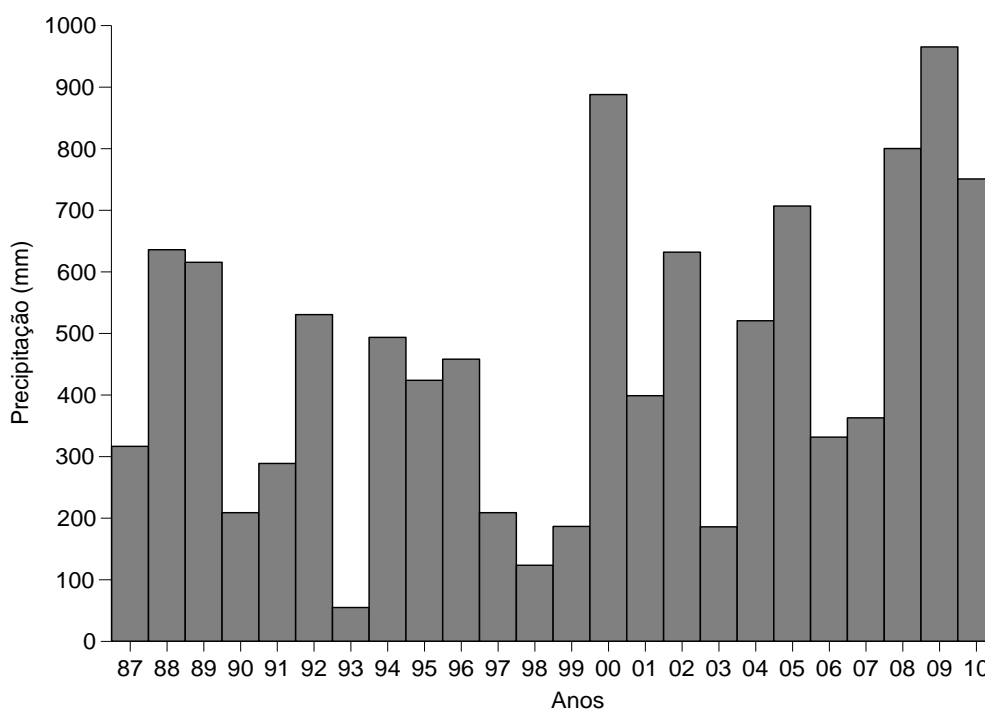


Figura 2. Precipitação anual na Bacia Experimental de São João do Cariri.
Fonte: Silva e Santos (2012)

A BESJC apresenta solos rasos, pouco porosos e predominantemente plásticos, com vegetação do tipo caatinga (PAIVA et al., 2011). O embasamento geológico é de natureza cristalina, compreendendo rochas metamórficas e ígneas antigas, do Pré-Cambriano. A Figura 3 mostra a espacialização dos tipos de solos encontrados na Bacia Experimental de São João do Cariri que são: Cambissolo Háplico, Neossolo Litólico, Luvissolo Crômico e Vertissolo Cromado.

Os solos do tipo Cambissolo apresentam permeabilidade muito baixa, pois, apresentam alta quantidade de silte e pouca profundidade. Além disso, são considerados “jovens” e pouco desenvolvidos, pouco profundos e normalmente cascalhentos (SILVA e MEDEIROS 2014). Para Paes-Silva (2002) os Neossolos Litólicos apresentam textura arenosa ou média, são muito rasos ou rasos e moderadamente drenados com horizonte A fraco ou moderado.

Os Luvissolos Crômicos possuem minerais de fácil intemperização e apresentam boa fertilidade. Na bacia esses solos são rasos a moderadamente profundos, bem drenados e com textura argilosa (CHAVES, 2002).

Paes-Silva (2002) caracteriza os Vertissolos Cromados como sendo, argilosos a muito argilosos, menos desenvolvidos, de boa fertilidade, rasos a moderadamente

profundos, podendo ser pedregosos, e são normalmente encontrados em áreas de relevo suave ondulado.

A Tabela 1 mostra a representatividade em km² de cada tipo de solo encontrado na BESJC. É possível verificar que o solo que possui maior área é o Luvisolo Crômico com 7,88 km², que representa 58,37% da área total da bacia, por sua vez o tipo de solo que possui a menor área é o Cambissolo Háplico com 0,67 km², o que representa 5,11% da bacia.

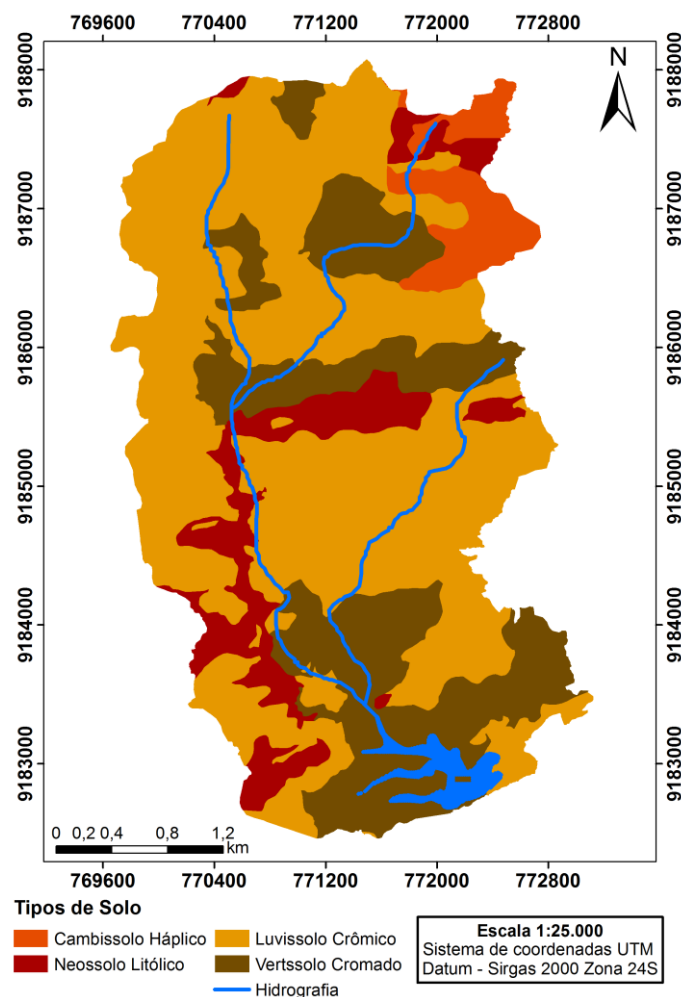


Figura 3. Tipos de solo da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Fonte: Silva e Medeiros (2014)

Tabela 1. Área dos tipos de solo

Tipo de Solo	Área (km ²)	%
Cambissolo Háplico	0,69	5,11
Neossolo Litólico	1,37	10,15
Luvisolo Crômico	7,88	58,37
Vertissolo Cromado	3,56	26,37
Total	13,50	100

Para a caracterização do relevo da área de estudo, foi elaborado um mapa de declividade a partir do modelo digital de elevação adquirido diretamente no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Valeriano, 2005; Valeriano et al., 2009), através do seguinte endereço: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>, o qual posteriormente foi georreferenciado e processado em ambiente SIG para o cálculo da declividade da bacia.

O relevo da BESJC apresenta-se em grande parte como plano e suavemente ondulado, conforme as classes de declividade propostas por Pereira e Lombardi Neto (2004) espacializadas na Figura 4.

Pode-se observar que as pequenas áreas que possuem maior declividade na BSEJC encontram-se nas porções leste e nordeste da bacia. A Tabela 2 mostra as áreas de cada classe de declividade, sendo que 56,52% da bacia insere-se na classe de relevo plano, que são áreas onde a declividade não ultrapassa 3%. A classe Suavemente Ondulada contém declividades de 3 a 8%, possui uma área de 5,55 km², o que representa 41,11% da área da bacia. As classes menos representativas são a Moderadamente Ondulado e Ondulado, com áreas de 0,29 e 0,03 km², respectivamente.

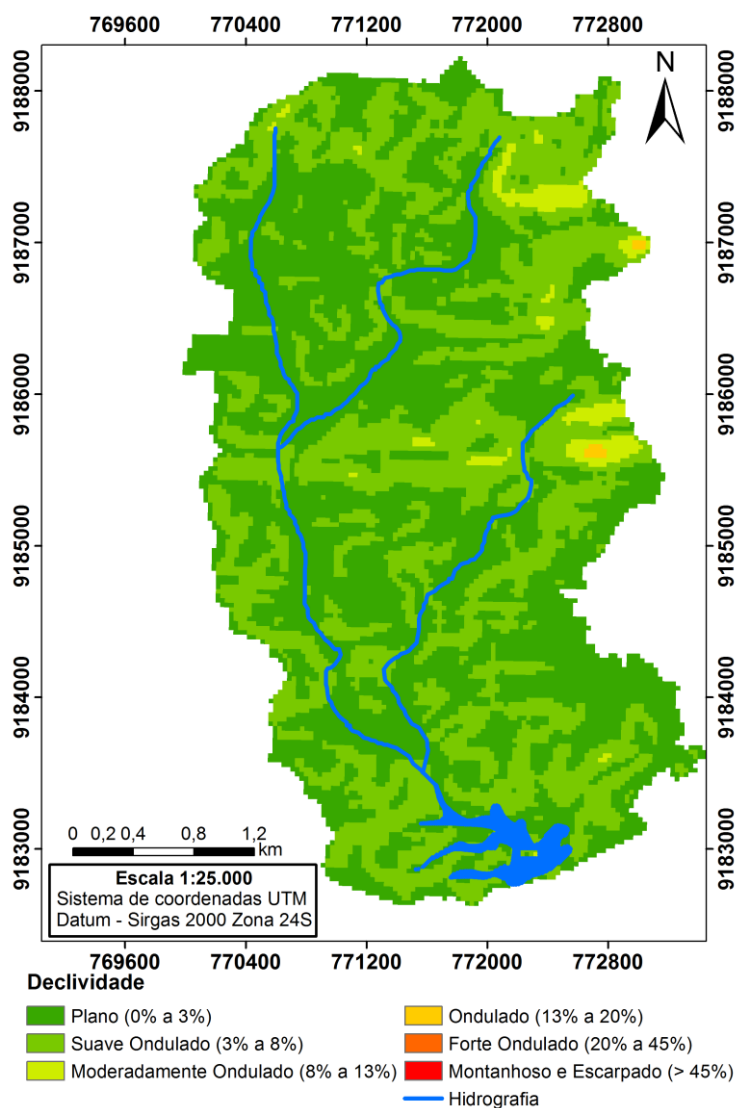


Figura 4. Declividade da Bacia Experimental de São João do Cariri.

Tabela 2. Classes de declividade

Classe	Área (km ²)	%
Plano (0% a 3%)	7,63	56,52
Suavemente Ondulado (3% a 8%)	5,55	41,11
Moderadamente Ondulado (8% a 13%)	0,29	2,15
Ondulado (13% a 20%)	0,03	0,22
Forte Ondulado (20% a 45%)	0,00	0,00
Montanhoso e Escarpado (> 45%)	0,00	0,00
TOTAL	13,50	100,00

3.2 Aquisição das Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas no presente trabalho foram adquiridas junto ao catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ao todo foram adquiridas 12 imagens do sensor TM do satélite LANDSAT 5 da órbita 215 e ponto 65.

Das 12 imagens adquiridas, utilizou-se para a estimativa dos parâmetros biofísicos e da evapotranspiração apenas as imagens dos dias 17/12/2004 e 28/10/2009, capturadas respectivamente nos horários de 9h 25min 28s e 9h 20min 58s, pois as demais cenas apresentavam presença de nuvem em alguma área da bacia.

Contudo, todas as 12 cenas foram utilizadas para analisar o desempenho do algoritmo SEBAL na estimativa da temperatura de superfície (T_s), pois em todas as cenas a área onde existem os geotermômetros não apresentou cobertura de nuvens.

A Tabela 3 mostra algumas informações das imagens adquiridas, como: Data da passagem do satélite, a elevação do Sol em graus e o azimute do Sol em graus.

Tabela 3. Informações das Imagens TM Landsat-5

Data	Elevação do Sol (°)	Azimute do Sol (°)
10/07/2004	46,069	47,067
01/12/2004	58,988	121,075
17/12/2004 ¹	56,935	122,527
07/03/2005	56,608	88,705
29/07/2005	49,012	50,156
18/09/2006	60,943	72,476
19/07/2007	48,822	46,169
19/06/2008	46,985	43,660
23/09/2008	59,862	77,654
28/10/2009 ¹	63,873	105,051
09/06/2010	48,226	43,035
28/08/2010	55,385	60,885

¹ Imagens utilizadas para estimativa da evapotranspiração.

A Tabela 4 mostra as características das imagens do TM LANDSAT-5, que são compostas por 7 bandas espectrais, onde cada uma compreende um comprimento de onda diferente. Na Tabela 4 também estão presentes os coeficientes de calibração a e b, bem como os valores de irradiância espectral no topo da atmosfera para cada comprimento de onda, valores, serão utilizados posteriormente na aplicação do algoritmo SEBAL (CHANDER e MARKHAM, 2013)

Tabela 4. Características e coeficientes de calibração das Imagens TM Landsat-5

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$)
		A	b	
1 (Azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (Verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (Vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,51	221,0	1036
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	–
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

3.3 Classificação das imagens de satélite

A classificação do uso e ocupação do solo foi realizada no *software* SPRING 5.2.3. As imagens das duas cenas foram empilhadas e gerada a composição colorida 3(R), 4(G) e 2(B). Em seguida, as imagens foram classificadas pelo método de classificação não-supervisionada usando o classificador de imagens K-Médias, posteriormente foram identificadas três classes temáticas de uso e ocupação do solo: Vegetação arbustiva, Vegetação rasteira e Solo exposto.

3.4 Aplicação do Algoritmo SEBAL

A execução do algoritmo SEBAL pode ser dividida em duas partes, a primeira composta por 11 etapas onde é estimado o saldo de radiação a superfície (R_n) e uma segunda parte onde se calcula os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) que servem de base para a estimativa da evapotranspiração (Figura 5).

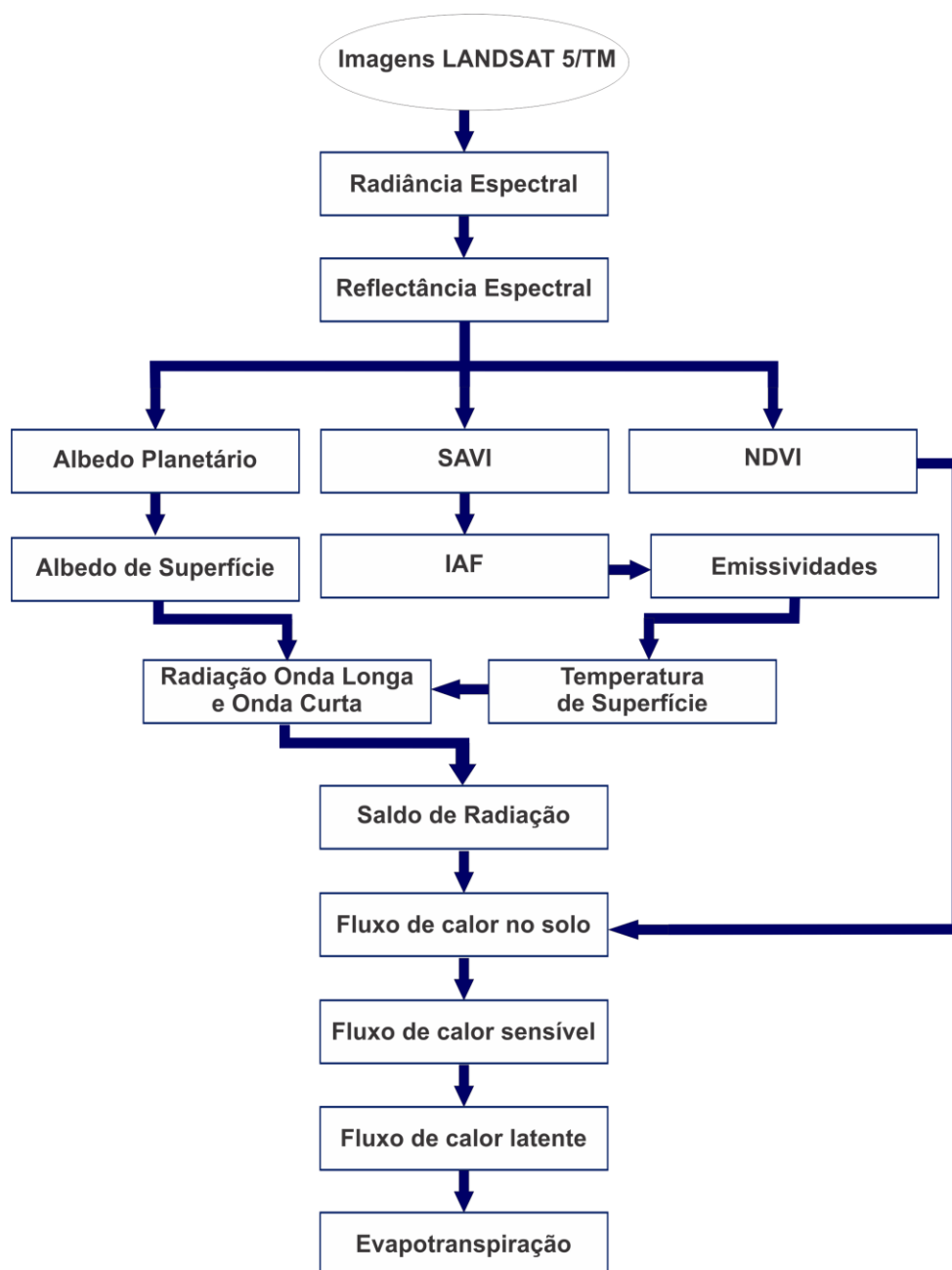


Figura 5. Fluxograma das etapas para obtenção da evapotranspiração.

A primeira etapa é o cálculo da radiância espectral para cada banda ($L_{\lambda i}$). Nesse processo acontece a conversão do número digital (ND) da imagem para valores de radiância espectral, que representa a quantidade de energia refletida de cada pixel que se propaga em um ângulo sólido. Essa etapa foi realizada para todas as bandas da imagem (1, 2, 3, 4, 5 e 7, na banda 6, essa radiância representa a energia emitida por cada pixel. A calibração é executada segundo a equação 1 de (MARKHAM e BAKER, 1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND \quad (1)$$

sendo a e b as radiâncias espectrais mínima e máxima ($W/m^2/sr/\mu$) apresentadas na tabela 4; ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e i corresponde as bandas (1, 2, ... e 7) da imagem.

Posteriormente foram calculadas as refletâncias monocromáticas ($\rho_{\lambda i}$) para cada banda, definida por Meneses e Almeida (2012), como sendo a razão da quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área do terreno (radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (irradiância), medida no mesmo instante de tempo, que é obtida segundo a equação 2:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

sendo qual $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($W/m^2/\mu m$) presente na tabela 4, Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_o) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA), que de acordo com Iqbal (1983), é dado pela equação 3:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DSA \cdot 2\pi / 365) \quad (3)$$

sendo DSA o dia sequencial do ano e o argumento da função \cos está em radianos. O valor médio anual de d_r é igual a 1,00 e o mesmo varia de 0,97 a 1,03, aproximadamente. Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo, declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol (E), que se encontra no cabeçalho da imagem, ou seja:

$$\cos z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \sin(E) \quad (4)$$

A terceira etapa consiste na obtenção do albedo planetário (α_{toa}), isto é, o albedo da superfície sem correção da atmosfera, é como se a presença da atmosfera tenha sido desprezada. Portanto o albedo planetário é obtido através das reflectâncias monocromáticas conforme a equação 5:

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (5)$$

no qual, $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são as reflectâncias das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Nota-se que os pesos da equação acima, correspondem ao valor da irradiância solar monocromática – $I_{sol,b}$ de dada banda (Tabela 4) pela somatória das irradiâncias de todas as bandas ($\Sigma I_{sol,b}$), ou seja: peso da banda $b = I_{sol,b} / \Sigma I_{sol,b}$.

Na Etapa 4 obtém-se o albedo da superfície ou albedo corrigido dos efeitos atmosféricos α , o que pode ser feito a partir da equação 6:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}} \quad (6)$$

sendo α_{toa} o albedo planetário, α_p a reflectância da própria atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas que em várias aplicações tem sido recomendado o valor de 0,03; τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, que para condições de céu claro, pode ser obtida pela equação 7 (ALLEN et al., 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z \quad (7)$$

o qual z é a altitude de cada pixel (m). Se o usuário já dispuser de um DEM da sua área de interesse, o mesmo poderá calcular a transmissividade de cada pixel, o que é recomendado para áreas com relevo mais movimentado.

Na quarta etapa calculam-se os índices de vegetação, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF). O NDVI é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), pela soma das mesmas (equação 8).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (8)$$

Sendo que ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do TM Landsat 5.

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a $+1$ e para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 a 1, já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

Para a estimativa do SAVI, que é um índice que busca amenizar os efeitos do solo, tem sido utilizada a equação 9 (HUETE, 1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (9)$$

sendo o fator L uma função do tipo de solo, utilizamos $L = 0,1$.

O IAF é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela equação 10 obtida por Allen et al. (2002).

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (10)$$

A partir do NDVI e do IAF é possível calcular as emissividades que são necessárias para a estimativa da temperatura de superfície, bem como as demais etapas do algoritmo. São elas: A emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ϵ_{NB} (10,4 – 12,5 μm) e a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 (5 – 100 μm). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades ϵ_{NB} e ϵ_0 podem ser obtidas, para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$, conforme as equações 11 e 12, respectivamente.

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033.IAF \quad (11)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01.IAF \quad (12)$$

Contudo, para pixels com $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ e para corpos d'água ($NDVI < 0$) $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme recomendações de Allen e al. (2002).

Posteriormente a temperatura da superfície (T_s) é calculada utilizando a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e a emissividade ϵ_{NB} obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela equação 13.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (13)$$

sendo $K_1 = 607,76 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu m$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ constantes de calibração da banda termal do TM - Landsat 5 (Allen et al., 2002).

Com a T_s calculada pode-se obter a radiação de onda longa emitida por cada pixel $R_{ol,emi}$ (W/m^2), sendo obtida através da equação de Stefan-Boltzman (equação 14):

$$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4 \quad (14)$$

Sendo que ε_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \times 10^8 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$) e T_{sup} é a temperatura da superfície (K).

A radiação de onda curta incidente $R_{sol,inc}$ (W/m^2) é o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada pela equação 15 (ALLEN et al., 2002).

$$R_{sol,inc} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (15)$$

sendo S a constante solar (1367 W/m^2), Z o ângulo zenital solar, d_r o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica.

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície $R_{ol,atm}$ (W/m^2) pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzmann (equação 16):

$$R_{ol,atm} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (16)$$

em que ε_a é a emissividade atmosférica obtida por: $\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ (ALLEN et al., 2002), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_a é a temperatura do ar (K).

De posse da estimativa dos três tipos de radiação supracitados, calculou-se então o saldo de radiação à superfície (R_n) segundo a equação 17:

$$R_n = R_{sol,inc} (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emit} + R_{ol,atm} - (1 - \varepsilon_o) R_{ol,atm} \quad (17)$$

sendo $R_{sol,inc}$ a radiação de onda curta incidente, α_{sup} o albedo corrigido, $R_{ol,atm}$ a radiação de onda longa emitida pela atmosfera, $R_{ol,emit}$ a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ε_o a emissividade de cada pixel.

Com o R_n calculado, o fluxo de calor no solo G (W/m^2) pode ser obtido segundo a equação 18 desenvolvida por Bastiaanssen (2000).

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \right] R_n \quad (18)$$

Em que α é o albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, todos calculados para cada pixel. Para efeito de correção dos valores do

fluxo de calor no solo para corpos d'água (NDVI<0), pode ser utilizada a seguinte expressão: $G = 0,3 \times R_n$ ou $G = 0,5 \times R_n$, segundo Allen et al. (2002).

O fluxo de calor sensível H (W/m^2) é estimado como mostra a equação 19, com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis da superfície segundo Bastiaanssen et al. (1998):

$$H = \rho c_p \frac{(a + b T_s)}{r_{ah}} \quad (19)$$

sendo ρ a massa específica do ar, c_p o calor específico do ar ($1004 J/Kg/K$), a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis Z_1 e Z_2 e r_{ah} a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m).

Para a obtenção de H com o algoritmo SEBAL, faz-se necessário o conhecimento de dois pixels, denominados pixels “âncoras”, para se determinar a variação de temperatura (dT) e a resistência r_{ah} em todos os pixels da área de estudo.

Inicialmente, a resistência aerodinâmica r_{ah} (s/m) é computada admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra, segundo a equação 20:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \times k} \quad (20)$$

sendo z_1 e z_2 as alturas em metros acima da superfície, u_* a velocidade de fricção (m/s) e k a constante de von Karman (0,41).

Dessa forma, obtém-se o coeficiente de rugosidade local z_{0m} em função da altura média da vegetação em torno da estação climatológica (h), segundo a equação 21 proposta por Brutsaert (1982):

$$z_{0m} = 0,12h \quad (21)$$

A velocidade de fricção u_* (m/s) é computada usando o perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra como mostra a equação 22:

$$u_* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (22)$$

no qual k é a constante de von Karman, u_x é a velocidade do vento (m/s) na altura z (2,0 m, por exemplo) e z_{0m} é a coeficiente de rugosidade (m).

Posteriormente, considerando a atmosfera em equilíbrio neutro, é estimada a velocidade do vento ao nível de $z = 200$ m [u_{200} (m/s)], onde os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, e que é dada pela equação 23.

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (23)$$

Admitindo que a u_{200} é constante em toda a cena, obtêm-se a velocidade de fricção u_* (m/s) para cada pixel da imagem, através da equação 24.

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)} \quad (24)$$

Sendo que z_{0m} (m) pode ser obtido em função do SAVI segundo a equação 25 desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62SAVI) \quad (25)$$

O cálculo da diferença de temperatura próxima à superfície dT (°C) para cada pixel é dado através de uma relação linear entre dT e T_{sup} (temperatura da superfície), como mostra a equação 26:

$$dT = a + bT_{sup} \quad (26)$$

em que os coeficientes a e b são obtidos através dos pixels âncoras (quente e frio), conforme visto na sequência.

Para a definição do pixel “frio” da imagem, é necessário que seja localizado em um corpo hídrico ou admite-se que este se encontra numa área bem irrigada, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{frio} = 0$) e o fluxo de calor latente LE_{frio} (W/m²) é dado pela equação 27:

$$LE_{frio} = R_n - G \quad (27)$$

Já para o pixel “quente” é necessária uma área onde haja a predominância de solo exposto, onde se assume que o fluxo de calor latente é nulo ($LE_{\text{quente}} = 0$) e portanto o fluxo de calor sensível H_{quente} (W/m^2) é dado segundo a equação 28:

$$H_{\text{quente}} = R_n - G = \frac{\rho c_p (a + bT_{\text{sup}})}{r_{\text{ah}}} \quad (28)$$

sendo T_{sup} , R_n , G e r_{ah} obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obtém-se, no pixel quente: $a + bT_{\text{sup}} = r_{\text{ah}}(R_n - G)/\rho c_p$. Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $a + bT_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e b . Logo, pode-se obter H , segundo a equação de H .

Contudo, os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem apenas como valores iniciais de um processo iterativo (Figura 6), e que nas etapas seguintes se considerada, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Portanto, devido os efeitos das condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, a teoria da similaridade de Monin-Obukhov é aplicada, sendo considerada para o cálculo do fluxo de calor sensível para todos os pixels da imagem.

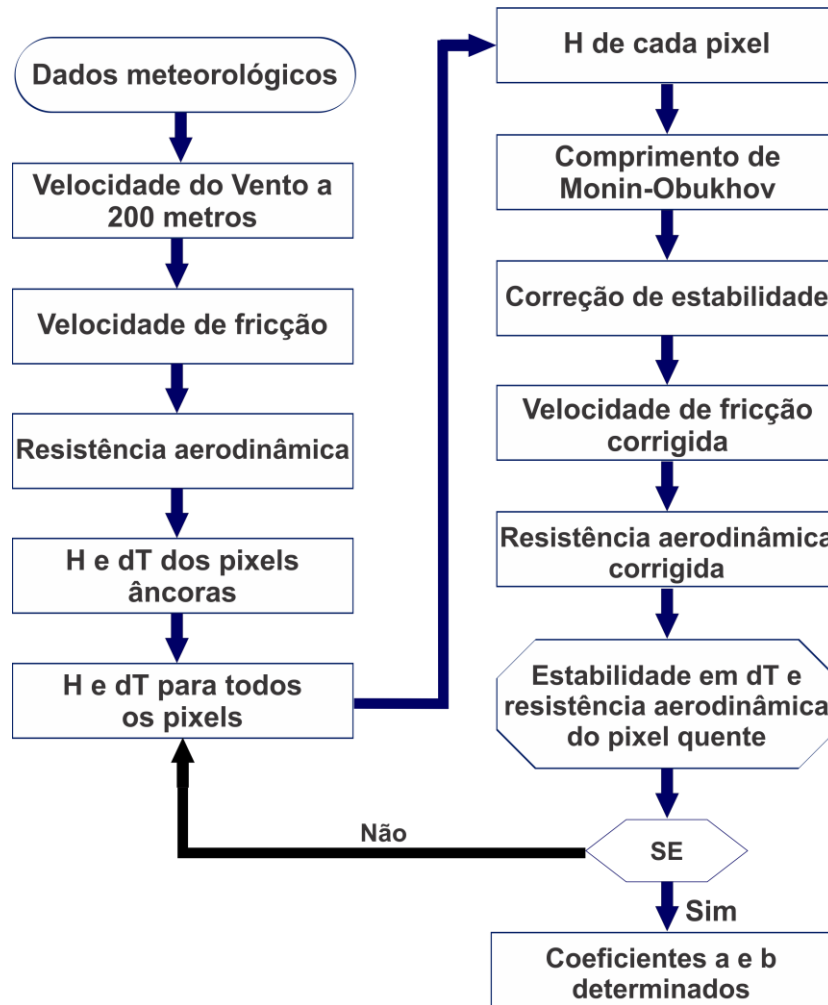


Figura 6. Fluxograma do processo iterativo do SEBAL, para determinação da evapotranspiração diária.

O comprimento de Monin-Obukhov (L em m) é utilizado para a identificação das condições de estabilidade da atmosfera e é calculado com base nos fluxos de calor e de *momentum* pela equação 29.

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (29)$$

sendo ρ a densidade do ar ($1,15 \text{ kg/m}^3$), c_p o calor específico do ar a pressão constante, u_* a velocidade de fricção de cada pixel das imagens (m/s), T_{sup} a temperatura da superfície (K), g o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ m/s}^2$) e H o fluxo de calor sensível (W/m^2), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade.

Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) deverão ser considerados. Para isto, utilizam-se as equações 30–39 (PAULSON, 1970 *apud* BASTIAANSSEN, 2000; WEBB, 1970 *apud* BASTIAANSSEN, 2000).

1) Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$\psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(200m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(200m)}) + 0,5 \pi \quad (30)$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (31)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \quad (32)$$

Em que:

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L} \right)^{0,25} \quad (33)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L} \right)^{0,25} \quad (34)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L} \right)^{0,25} \quad (35)$$

2) Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{200}{L} \right) \quad (36)$$

$$\psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (37)$$

$$\psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L} \right) \quad (38)$$

3) Se $L=0$ (condição de neutralidade): $\psi_m = 0$ e $\psi_h = 0$.

O valor corrigido para a velocidade de fricção u_* (m/s) é dado por:

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right) - \psi_{m(200m)}} \quad (39)$$

na qual, u_{200} é a velocidade do vento a 200 m (m/s), k é a constante de von Karman (0,41), z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\psi_{m(200m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de *momentum* a 200 m.

Tendo obtido u_* corrigido, foi obtido o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (s/m), usando a equação 40:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k} \quad (40)$$

sendo que $z_2 = 2,0$ m, $z_1 = 0,1$ m, e $\psi_{h(z_2)}$ e $\psi_{h(z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

Uma vez corrigidos u_* e r_{ah} retorna-se ao cálculo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos supracitados até que se obtenha estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência aerodinâmica (r_{ah}).

Posteriormente foi calculado o fluxo de calor latente (LE) que compreende o fluxo de massa na atmosfera proveniente da evaporação, mais a transpiração das plantas de dada área é calculado a partir da equação 41:

$$L_E = R_n - G - H \quad (41)$$

sendo R_n o saldo de radiação a superfície, G o fluxo de calor no solo e o H o fluxo de calor sensível.

Por fim, calculou-se a evapotranspiração diária que é determinada com base da fração evaporativa instantânea, definida pela razão entre L_E e $R_n - G$, como mostrado na equação 42:

$$F_{Ei} = \left(\frac{L_E}{R_n - G} \right) = F_{E24h} = \frac{L_{E24h}}{R_{n24h}} \quad (42)$$

em que F_{Ei} é a fração evaporativa instantânea, R_{n24h} o saldo de radiação diário, FE_{24h} é a fração evaporativa diária e L_{E24h} é o calor latente diário. Admite-se que $G_{24h} = 0$. Assim, a L_{E24h} será dada conforme a equação 43:

$$L_{E24h} = F_{Ei} \cdot R_{n24h} \quad (43)$$

sendo $R_{n24h} = R_{s\downarrow 24h} (1 - \text{albedo}) - 110\tau_{sw\downarrow 24h}$ e a conversão da LE_{24h} em ET_{24h} que é calculada como mostra a equação 44:

$$ETP_{24h} = 0,035 \left[(1 - \alpha) R_{s\downarrow 24h} - 110\tau_{sw\downarrow 24h} \right] \quad (44)$$

Sendo que ETP_{24h} é a evapotranspiração diária, $R_{s\downarrow 24h}$ é a radiação solar incidente no período de 24 horas e $\tau_{sw\downarrow 24h}$ é a transmissividade média.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estudo da evolução do uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de São João do Cariri

As Figuras 7a–7b apresentam os resultados da classificação do uso e ocupação do solo da bacia, referentes a 17/12/2004 e 28/10/2009. Com base na classificação das duas cenas, foram mapeados três tipos de uso do solo: (a) Vegetação Rasteira; (b) Vegetação Arbustiva; e (c) Solo Exposto. Entre as imagens analisadas foi observado um crescimento de 110% da área ocupada com Solo Exposto (1,94 km² em 17/12/2004 e 4,08 km² em 28/10/2009). A área com Vegetação Arbustiva diminuiu de 40,22% para 16,07 %, uma redução de 60%. Em contrapartida, a Vegetação Rasteira sofreu um pequeno aumento em sua área, de 6,13 km² em 17/12/2004, para 7,25 km² em 28/10/2009 (Tabela 5).

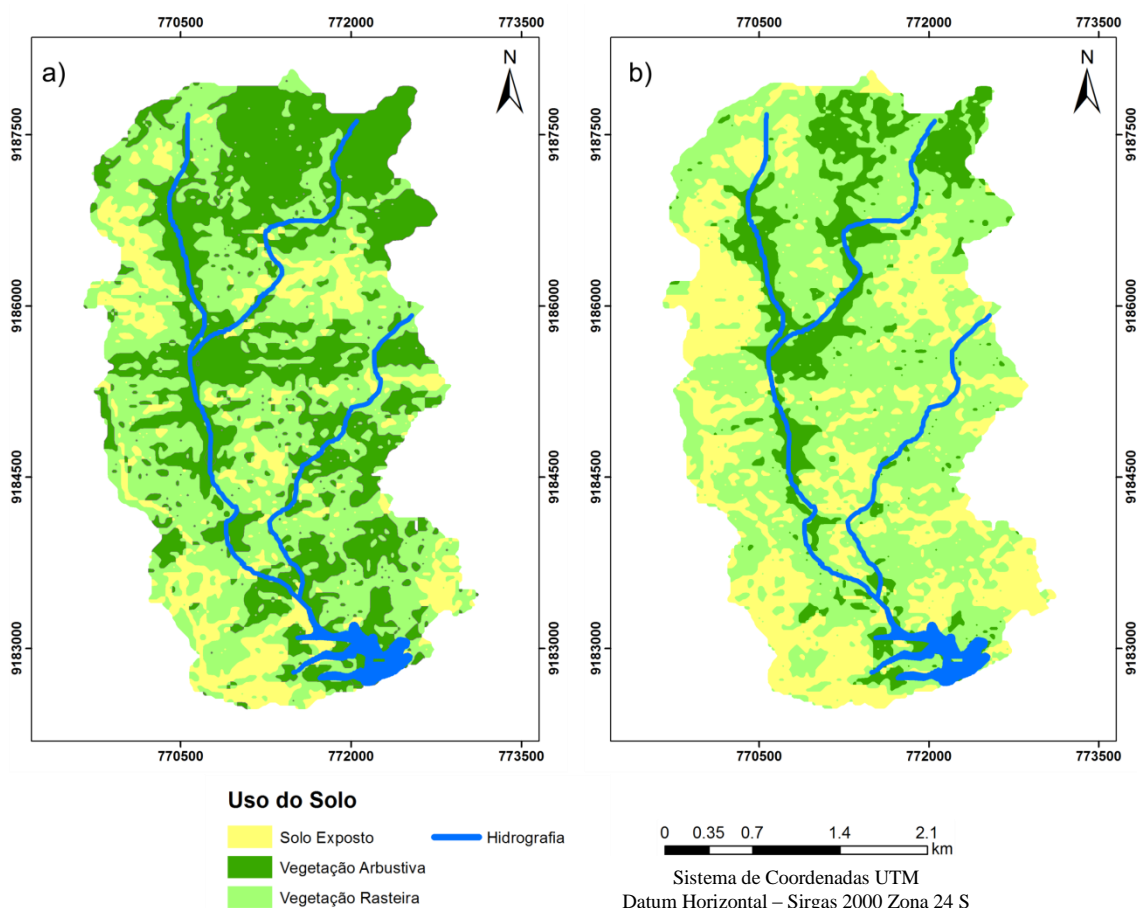


Figura 7. Classificação do uso e ocupação do solo da Bacia Experimental de São João do Cariri para as datas de 17/12/2004 (a) e 28/10/2009 (b).

Tabela 5. Áreas das classes de uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de São João do Cariri.

Classes de uso e ocupação do solo	Imagem de 17/12/2004		Imagem de 28/10/2009		Variação (%)
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	
Solo Exposto	1,94	14,43	4,08	30,26	109,62
Vegetação Arbustiva	5,43	40,22	2,17	16,07	-60,05
Vegetação Rasteira	6,13	45,34	7,25	53,68	18,37
Total	13,50	100	13,50	100	—

4.2 Análise do desempenho do algoritmo SEBAL na estimativa da temperatura de superfície em comparação com dados observados em campo

A Figura 8 apresenta os valores médios diários de temperatura do solo para cada dia do ano entre 2004 e 2010 nas três profundidades analisadas, coletados diariamente às 9:00 por geotermômetros instalados na Bacia Experimental de São João do Cariri. Como esperado, os maiores valores de temperatura do solo foram registrados na camada superficial do solo, com temperatura diária média de 35,2°C, enquanto nas profundidades de 5 e 10 cm, a temperatura diária média do solo foi de 31,1 e 31,3°C, respectivamente.

A Tabela 6 mostra os resultados de T_s estimados e os observados nas três profundidades e os valores médios. Ao analisar os valores estimados observou-se que em sua grande maioria, o algoritmo SEBAL subestimou na maior parte dos casos os valores observados de temperatura do solo em todas as profundidades. As maiores diferenças encontradas foram entre os valores estimados e as temperaturas observadas a 2 cm de profundidade, na qual a diferença chegou a mais de -10°C nas datas: 07/03/2005, 29/07/2005, 19/06/2008 e 28/08/2010.

As temperaturas que obtiveram menor diferença em relação às T_s estimadas foram registradas a 5 e 10 cm da superfície, com diferença média de -3,23 e -1,87 °C, respectivamente. A temperatura média observada para essas duas profundidades foram de 31,52 e 31,16°C, com desvio padrão de 4,55 para 5 cm e 3,74 para 10 cm de profundidade. A temperatura do solo média entre as três profundidades foi de aproximadamente 33°C, com diferença média de -3,64 °C, como pode ser visto na Tabela 6. Os maiores valores de desvio médio e desvio padrão, foram obtidos entre os valores estimados pelo SEBAL e as temperaturas do solo a 2 e 5 cm, com desvio padrão de 4,92 e 4,55, respectivamente.

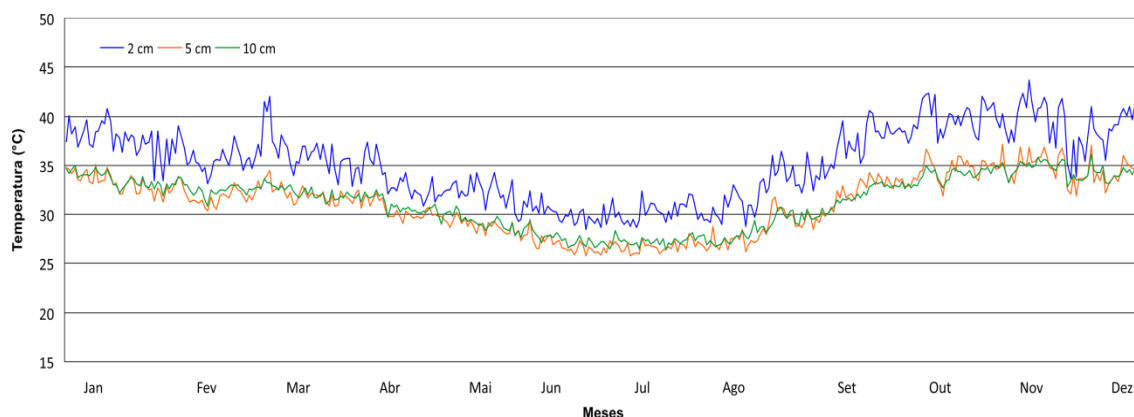


Figura 8. Variabilidade sazonal da temperatura do solo entre 2004 e 2010 nas três profundidades analisadas (2 cm, 5 cm e 10 cm).

Tabela 6. Diferença entre as 5 temperaturas estimadas e observadas

Data	T_e^1	2 cm		5 cm		10 cm		Média	
		T_o^2	D^3	T_o^2	D^3	T_o^2	D^3	T_o^2	D^3
10/07/2004	24,54	26,60	-2,06	27,00	-2,46	26,00	-1,46	26,53	-1,99
01/12/2004	35,99	39,00	-3,01	36,00	-0,01	35,20	0,79	36,73	-0,74
17/12/2004	34,77	39,80	-5,03	39,40	-4,63	36,00	-1,23	38,40	-3,63
07/03/2005	26,79	38,60	-11,81	36,00	-9,21	35,60	-8,81	36,73	-9,94
29/07/2005	25,38	37,50	-12,12	28,60	-3,22	29,00	-3,62	31,70	-6,32
18/09/2006	34,80	39,40	-4,60	31,60	3,20	32,00	2,80	34,33	0,47
19/07/2007	30,59	32,80	-2,21	28,60	1,99	29,40	1,19	30,27	0,32
19/06/2008	19,98	30,60	-10,62	25,00	-5,02	26,00	-6,02	27,20	-7,22
23/09/2008	26,34	34,00	-7,66	31,00	-4,66	33,00	-6,66	32,67	-6,33
28/10/2009	38,79	44,00	-5,21	37,00	1,79	34,60	4,19	38,53	0,26
06/09/2010	25,83	32,00	-6,17	28,00	-2,17	30,00	-4,17	30,00	-4,17
28/08/2010	27,67	39,20	-11,53	30,00	-2,33	27,10	0,57	32,10	-4,43
Média	29,29	36,13	-6,84	31,52	-2,23	31,16	-1,87	32,93	-3,64
Desvio Padrão	5,65	4,92	3,81	4,55	3,54	3,74	4,02	4,09	3,39

¹Temperatura estimada pelo SEBAL em °C; ²Temperatura observada em °C; ³Diferença entre as temperaturas observada e estimada.

A Figura 9 apresenta os valores da variabilidade dos dados de T_s observados e estimados pelo SEBAL. Nota-se que os dados observados nas profundidades de 5 e 10 cm mostram comportamento semelhante e pequena variação, com valores máximos que não ultrapassam 40°C, enquanto na profundidade de 2 cm a T_s máxima atingiu 45°C.

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos da correlação entre os dados observados e estimados de T_s . As melhores correlações (R^2) foram obtidas entre os valores estimados e os dados observados na profundidade a 5 cm, com $R^2 = 0,61$. A correlação entre T_s média das três profundidades de 2–10 cm também apresentou valor similar, com $R^2 = 0,58$. Nota-se um padrão das correlações com 5 e 0 cm, com vários valores mostrando uma tendência das imagens Landsat em captar respostas espectrais

nas camadas subsuperficiais, mesmo que em profundidades não muito grandes. Todos os valores estimados para 2 cm subestimaram os valores observados.

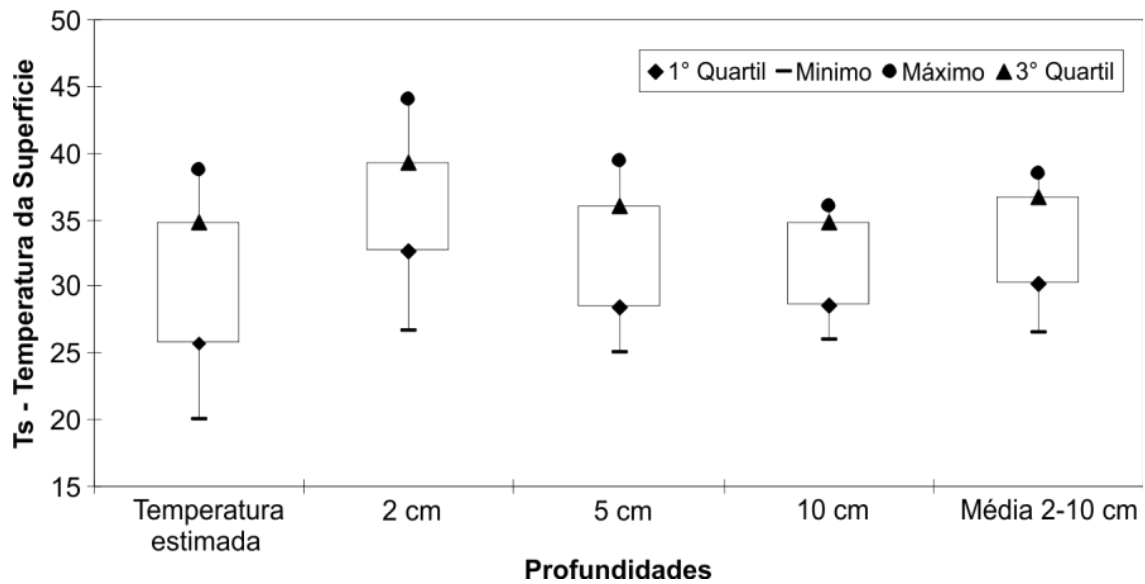


Figura 9. Parâmetros estatísticos da variabilidade dos dados de T_s observados e estimados

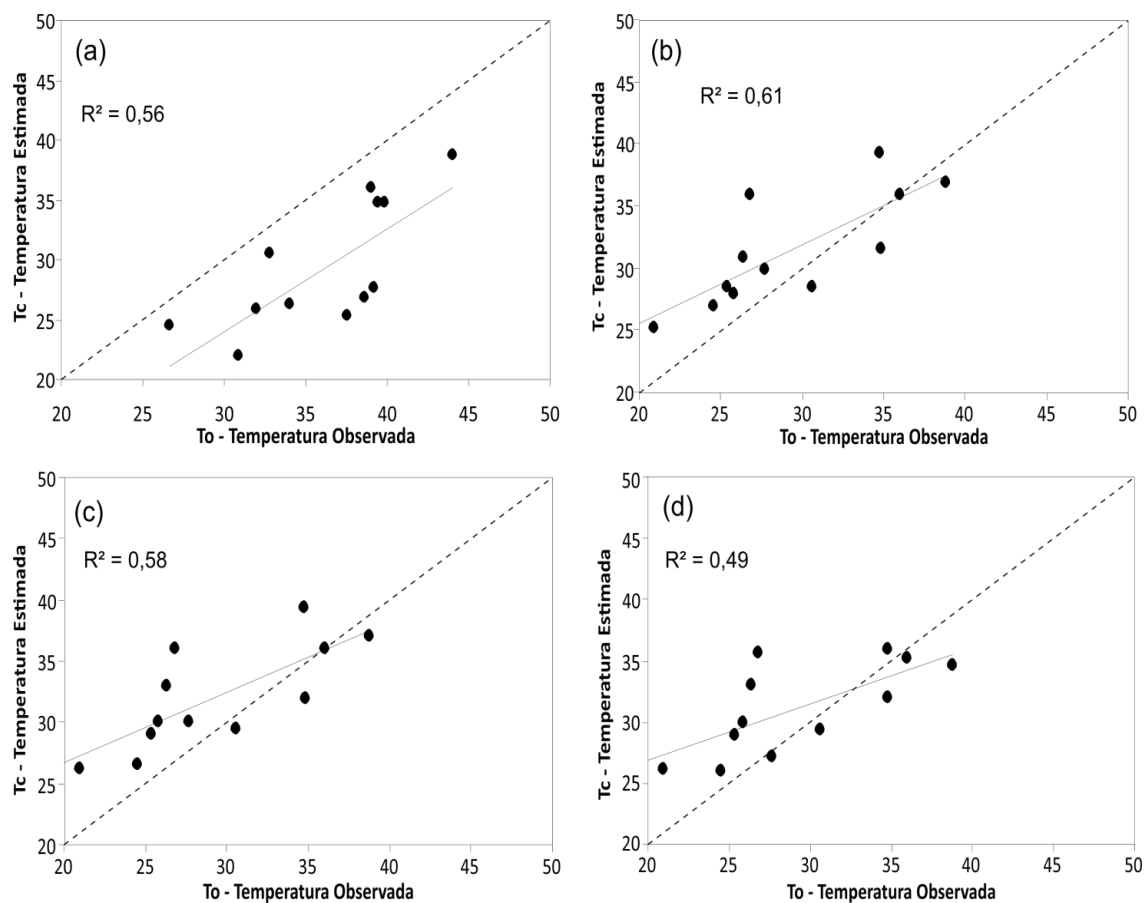


Figura 10. Comparação entre as temperaturas estimadas pelo SEBAL e as observadas nas profundidades de: (a) 2 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm e (d) média.

4.3 Estimativa dos parâmetros biofísicos na Bacia Experimental de São João do Cariri

Com base nas duas cenas analisadas, foi possível determinar os valores e as variações que ocorreram no albedo, nos índices de vegetação (NDVI, SAVI, IAF), no saldo de radiação e no fluxo de calor no solo. As Figuras 11a–11b mostram a espacialização do albedo à superfície na bacia. O albedo é um ótimo indicador de mudanças na cobertura de uma bacia hidrográfica, uma vez que varia de acordo com o tipo de alvo e sua composição químico-física, que recebe a radiação eletromagnética (SILVA et al., 2005).

Foram identificados valores com pequena variação de albedo para as duas cenas, com valores que variaram entre 0,041 e 0,304, em 17/12/2004, e entre 0,042 e 0,343, em 28/10/2009. Os valores médios de albedo também foram bastante similares (0,181 em 17/12/2004 e 0,187 para 28/10/2009). Os valores de albedo nas duas datas apresentam predominância da classe entre 0,20 e 0,25, e são mais presentes na porção sul da bacia onde predominam as áreas com Solo Exposto e Vegetação Rasteira. Apesar das mudanças e dos tipos de uso e ocupação do solo da bacia, essa proximidade dos valores de albedo para os dois períodos mostrou como as respostas espectrais da área de estudo para os diferentes tipos de uso do solo no semiárido são próximas.

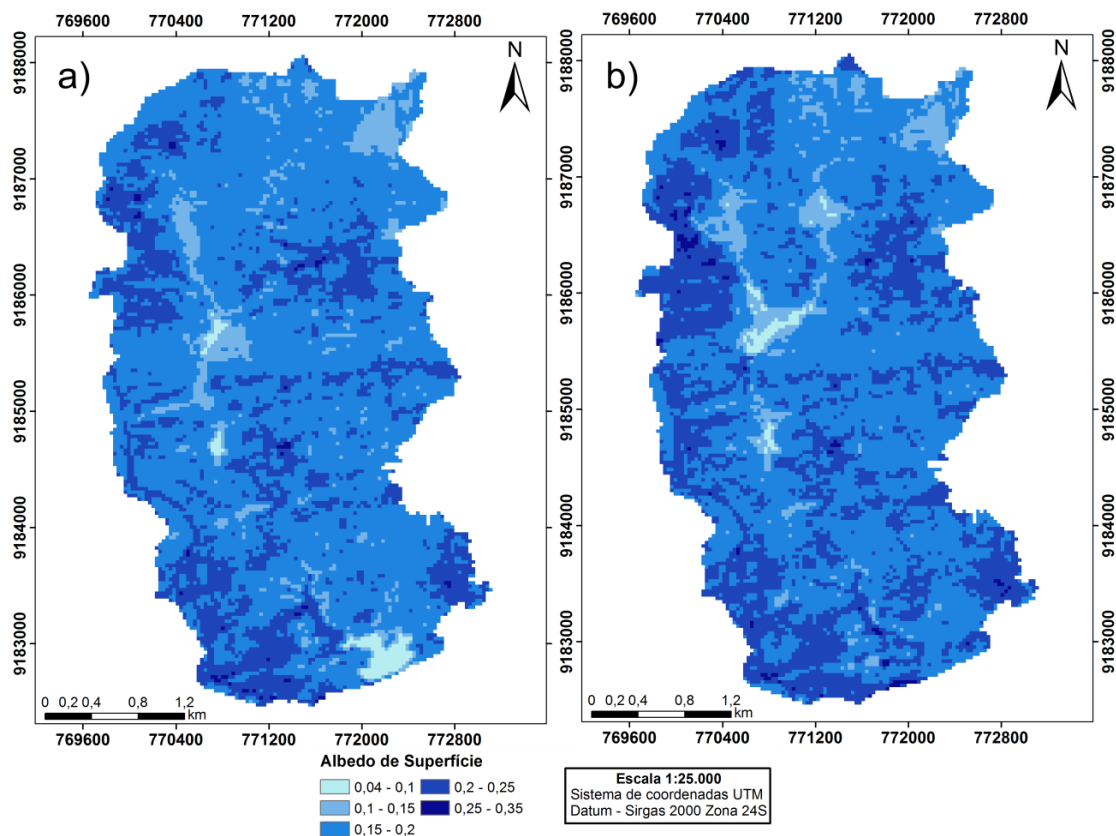


Figura 11. Mapa de albedo à superfície na Bacia Experimental de São João do Cariri para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

Os valores médios de albedo para as coberturas Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva e Solo Exposto foram de 0,187, 0,161 e 0,208, respectivamente para as duas cenas utilizadas neste estudo. O maior valor obtido de albedo ocorreu no Solo Exposto, em 17/12/2004 e o valor mais baixo nas áreas de Vegetação Arbustiva no dia 28/10/2009. Essa variação pode ser associada à precipitação sazonal na área, pois os meses com maior ocorrência de chuvas apresentam os menores valores de albedo, enquanto que os meses mais quentes apresentaram valores mais elevados. De modo geral, observou-se que os resultados obtidos de albedo neste estudo corroboram com os encontrados por Silva et al. (2008).

As Figuras 12, 13 e 14 mostram os mapas de NDVI, SAVI e IAF da Bacia Experimental de São João do Cariri, para os dias 17/12/2004 e 28/10/2009. Os resultados dos índices de vegetação mostram que houve um ligeiro aumento no vigor da vegetação, principalmente nas porções leste e nordeste da bacia.

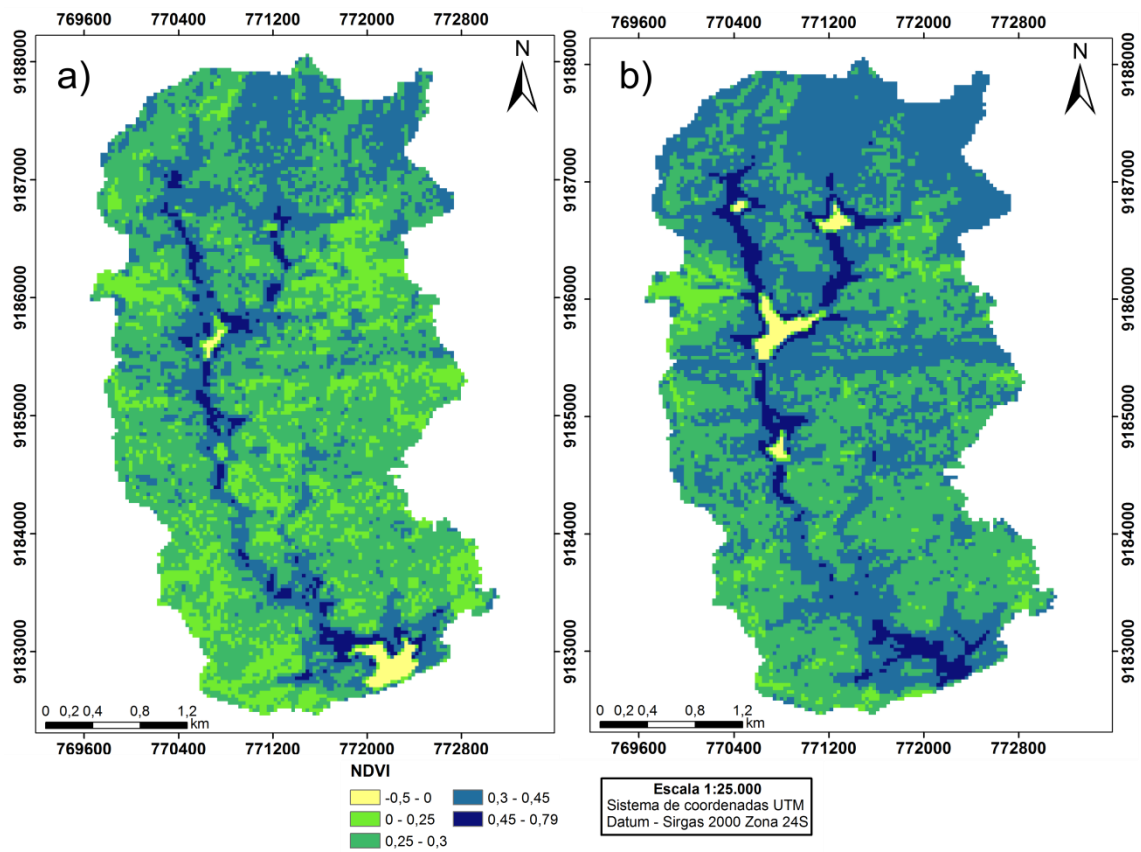


Figura 12. Mapas de NDVI da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

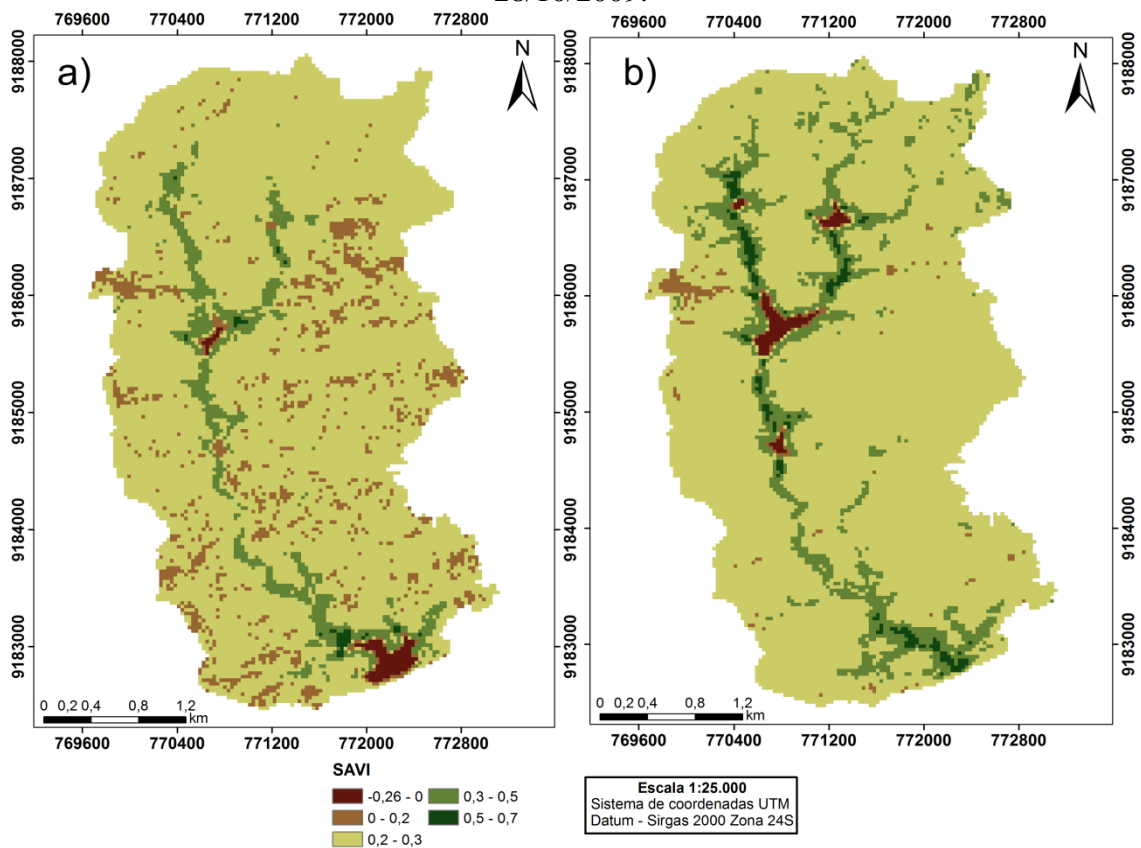


Figura 13. Distribuição espacial dos valores de SAVI da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

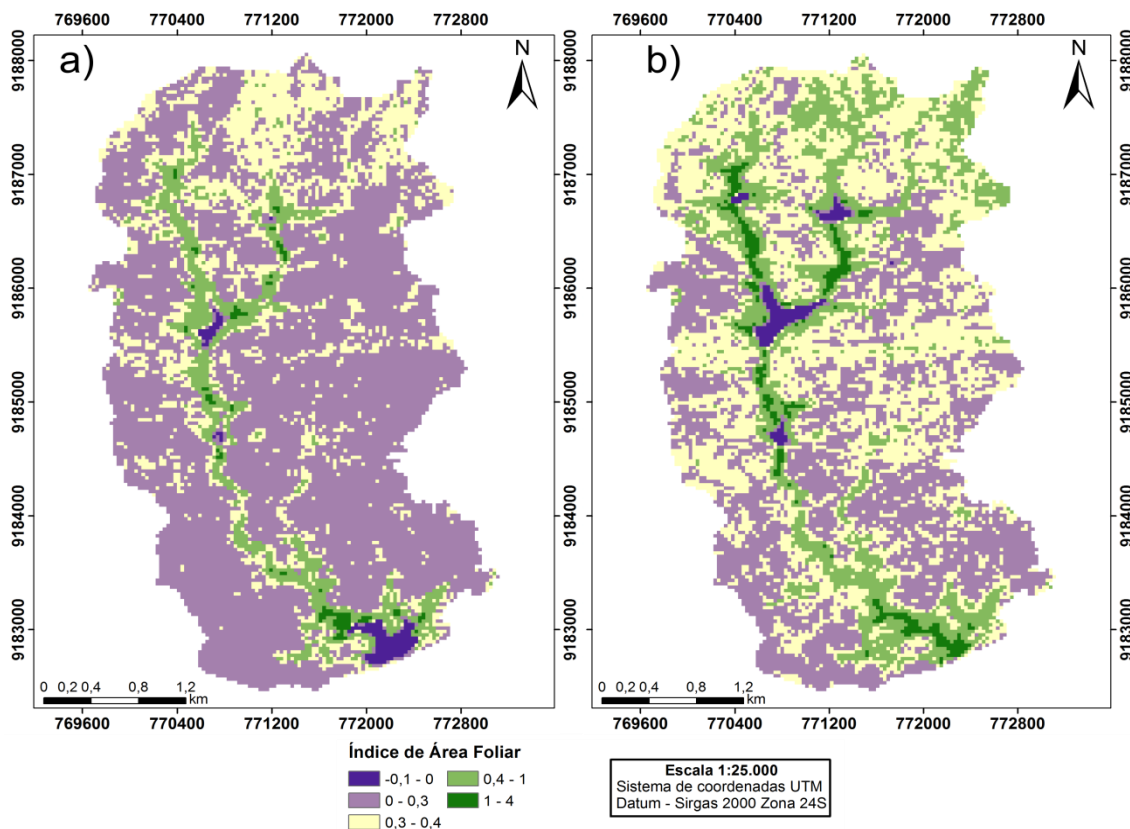


Figura 14. Espacialização dos valores de IAF da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

No que tange a análise do NDVI, notou-se que houve um aumento da área com valores de NDVI variando entre 0,3 e 0,45, assim como, uma diminuição das áreas com valores abaixo de 0,25 (Figuras 12a–b). Como esperado, esses resultados são indicadores de áreas com vegetação bastante rala ou sem vegetação, algo bastante característico do semiárido brasileiro (RODRIGUES et al., 2009). Contudo, em ambas as cenas é possível perceber a predominância dos valores menores que 0,3, que, de acordo com Gurgel et al. (2003) são comuns em áreas secas e com baixo regime pluviométrico.

As áreas com valores de SAVI menores que 0,2 diminuíram no período estudado. Notou-se também um pequeno aumento da área com valores maiores que 0,5 (Figuras 13a–b). Os resultados obtidos para o IAF mostraram uma diminuição nas áreas com valores $< 0,3$, contudo é possível observar um aumento nas áreas com valores acima de 0,3 (Figura 14a–b). Notou-se também que os maiores valores dos índices de vegetação são encontrados ao longo da rede hidrográfica e nas proximidades dos reservatórios de água na bacia. Com base nos histogramas a seguir é possível a melhor visualização dessas variações (Figuras 15a–c).

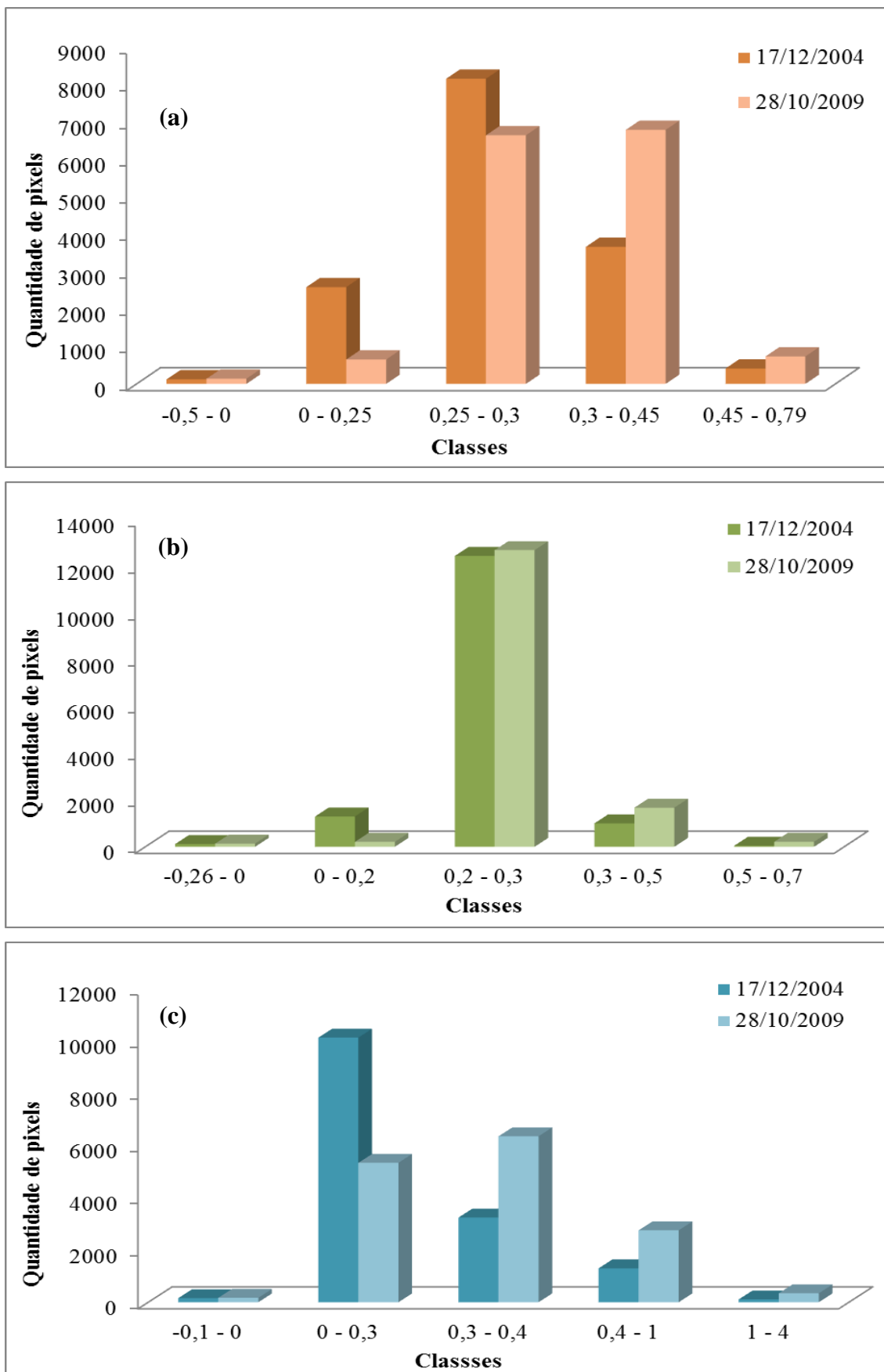


Figura 15. Histogramas dos índices de vegetação calculados para a Bacia Experimental de São João do Cariri: (a) NDVI, (b) SAVI e (c) IAF.

A Tabela 7 mostra os valores dos índices de vegetação estimados para a Bacia Experimental de São João do Cariri. Observou-se que os três índices de vegetação aumentaram seus valores médios e máximos. Os resultados mostraram uma variação média de cerca de 20% no NDVI e SAVI para as duas datas. Os resultados do IAF apresentaram uma variação de 1% e 5%, para 17/12/2004 e 28/10/2009, respectivamente.

Tabela 7. Valores dos índices de vegetação da área de estudo.

Índices	Imagem de 17/12/2004					Imagem de 28/10/2009				
	DP ¹	Var ²	Min	Max	Média	DP ¹	Var ²	Min	Max	Média
NDVI	0,07	0,24	-0,55	0,75	0,29	0,08	0,25	-0,45	0,79	0,31
SAVI	0,05	0,21	-0,26	0,67	0,23	0,06	0,23	-0,24	0,71	0,26
IAF	0,01	0,03	-0,16	3,64	0,29	0,02	0,05	-0,17	4,00	0,37

¹ Desvio padrão, ² Variação média.

Essas variações nos valores dos índices de vegetação podem ser explicadas pela alta irregularidade pluviométrica da região e pelas propriedades físico-químicas dos solos, que influenciam o comportamento sazonal da vegetação. Apesar das duas imagens serem do mesmo período de seus respectivos anos, essas variações podem ocorrer após pequenos eventos de chuva, pois os índices de vegetação, em especial o NDVI, possuem uma alta correlação com os eventos pluviométricos e, além disso, o próprio bioma Caatinga tem uma grande capacidade de produção de biomassa após as chuvas (GURGEL et al., 2003).

As Figuras 16a–b mostram os mapas de temperatura da superfície da bacia para as duas datas estudadas. Para a temperatura de superfície notou-se um aumento nos valores médios de aproximadamente 2°C entre as duas datas. Para o dia 17/12/2004 foram obtidas temperaturas variando de 21,7 a 38,8°C, já para o dia 28/10/2009, os valores de temperatura da superfície variaram entre 22 e 43°C, com valor médio igual a 37,47°C. De acordo com os resultados obtidos, observou-se um aumento das áreas com temperaturas superiores a 36°C para a imagem do dia 28/10/2009 em praticamente toda a área da bacia, principalmente nas áreas com Solo Exposto e Vegetação Rasteira.

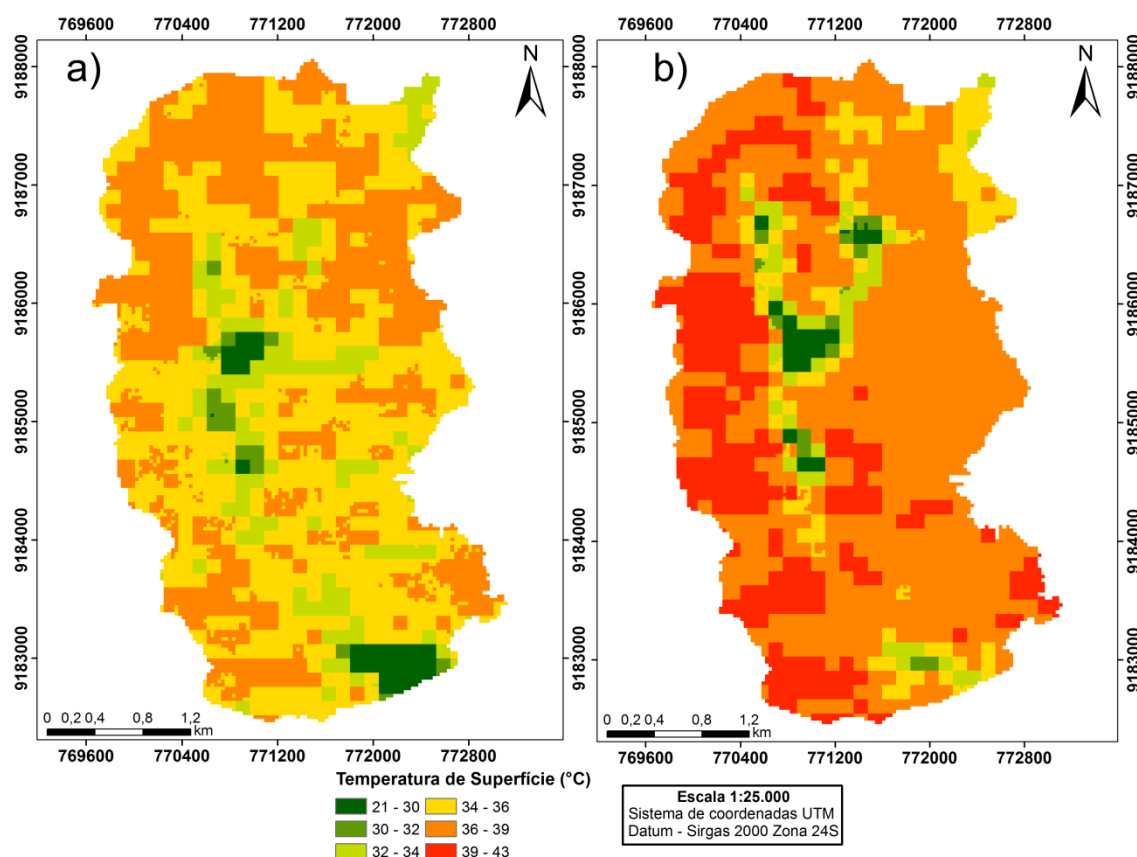


Figura 16. Mapas de temperatura de superfície da área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

Os menores valores de temperaturas foram encontrados nos corpos hídricos e na Vegetação Arbustiva, com valores entre 21 e 34°C (cor verde escuro e verde claro), para a Vegetação Arbustiva e pequenas porções de Solo Exposto foram obtidos os valores medianos na cor amarela e laranja, que equivalem às áreas entre 34 e 39°C. Para as áreas mais quentes foi definida a cor vermelha, representando as áreas com temperaturas entre 39 e 43°C, localizadas predominantemente nas áreas com Solo Exposto.

As Figuras 17a–b apresentam os mapas temáticos de saldo de radiação à superfície (R_n) para os dias 17/12/2004 e 28/10/2009. Os valores mínimos, máximos e médios encontrados nas duas cenas foram: 520,3 W/m², 818,6 W/m² e 635,3 W/m², para 17/12/2004 e 698,0 W/m², 1016,0 W/m² e 817,8 W/m², para 28/10/2009. Esses resultados corroboram com os obtidos por Bezerra et al. (2008), para a mesorregião do Cariri, no sul do Estado do Ceará, com valores médios entre 600 e 700 W/m². Para Bisht e Bras (2010), esse parâmetro biofísico mostra alta resolução espacial e baixa resolução temporal, quando comparado com observações de campo. Nesse sentido, os resultados obtidos mostram que os valores de R_n apresentaram as maiores diferenças entre as duas

imagens. Segundo Gomes et al. (2013), essa variação ocorre em função de diversas características da própria superfície, dentre elas a cobertura e uso do solo, o albedo, a umidade e a temperatura do solo.

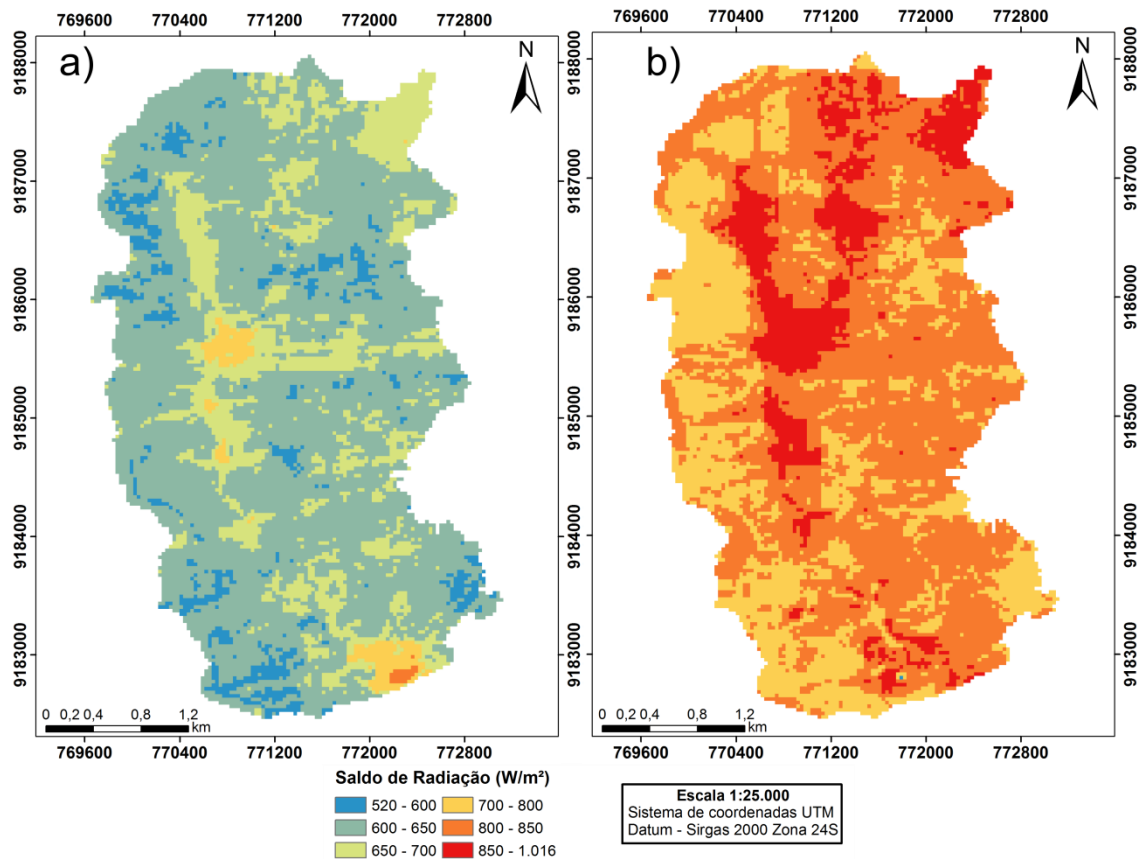


Figura 17. Mapas do saldo de radiação à superfície na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

Os valores médios de saldo de radiação para as áreas com Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva e Solo Exposto foram de 883,8, 755,5 e 701,6 W/m^2 , respectivamente para as duas cenas utilizadas neste estudo. Observou-se que nas áreas onde ocorrem os menores valores de NDVI, são encontrados também valores de R_n mais baixos (porção oeste da bacia); já os maiores encontram-se nas áreas de maior NDVI e de temperaturas mais baixas (parte central da bacia).

As Figuras 18a–b apresentam a distribuição de fluxo de calor no solo na área de estudo nas duas imagens utilizadas. O fluxo de calor no solo representa a quantidade de energia que foi absorvida pelo mesmo e que é expressa pela temperatura de superfície. Os valores de fluxo de calor em 17/12/2004 variaram de 71,8 W/m^2 a 245,6 W/m^2 e com um fluxo médio de 115,1 W/m^2 . Os valores de fluxo de calor obtidos para o dia 28/10/2009 foram de 91,4 a 303,9 W/m^2 , com valor médio de 157,4 W/m^2 . Com relação

aos valores médios do fluxo de calor no solo para as coberturas de Vegetação Rasteira, Vegetação Arbustiva e Solo Exposto, foram de 134,4, 133,6 e 138,7 W/m², respectivamente para as duas imagens utilizadas neste estudo.

De acordo com a Figura 18a, verificou-se que em 17/12/2004 os valores de fluxo de calor em grande parte da bacia variaram entre 110 e 120 W/m², onde predominam as áreas com Vegetação Rasteira. No dia 28/10/2009 os valores registrados estão entre 150 e 200 W/m², também são encontrados nas áreas de Vegetação Rasteira e de Solo Exposto. Os maiores valores encontrados nas duas cenas ocorrem nos corpos hídricos, que segundo Rodrigues et al. (2009) apresentam esse comportamento devido ao fato do elevado calor específico da água, e os menores valores são encontrados nas áreas de vegetação mais densa, principalmente ao longo da rede hidrográfica.

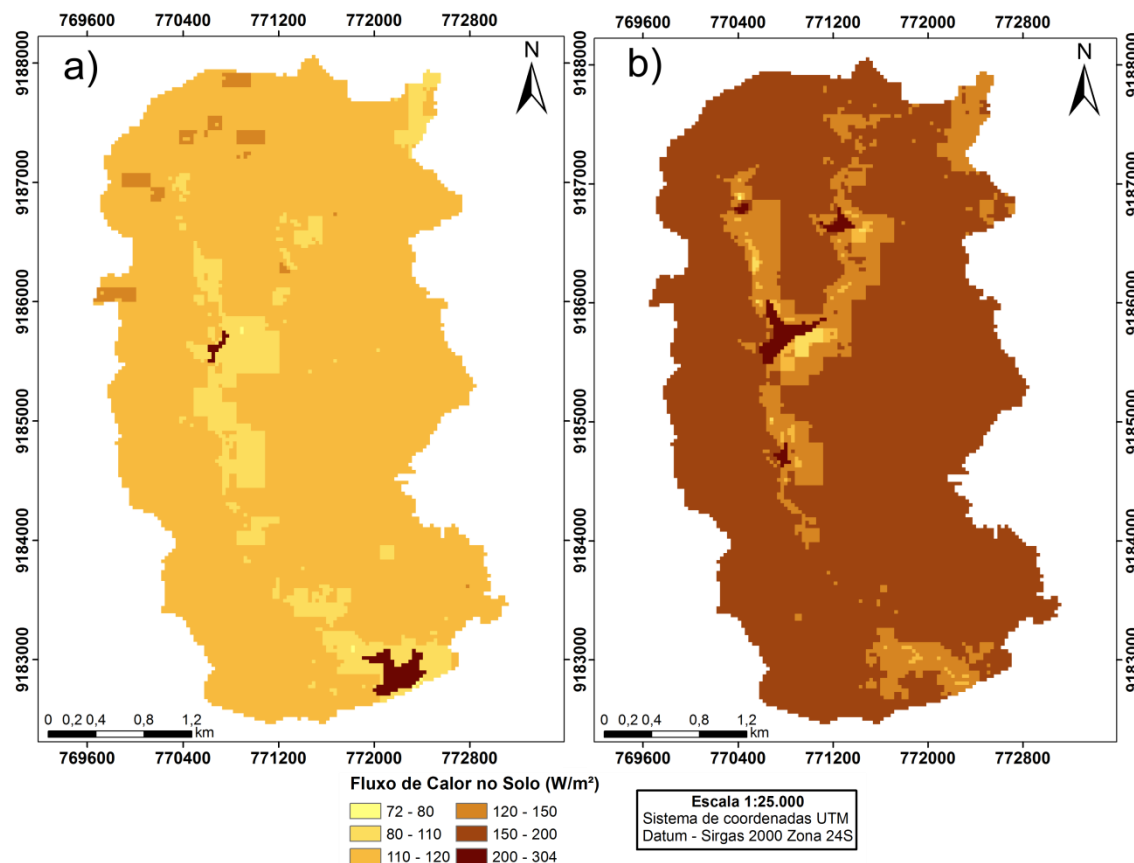


Figura 18. Mapas de fluxo de calor no solo na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

4.4 Determinação da evapotranspiração diária para a Bacia Experimental de São João do Cariri.

As Figuras 19a–b mostram a espacialização da evapotranspiração diária para as duas cenas estudadas. Para a imagem do dia 17/12/2004 (Figura 19a) obteve-se valores de evapotranspiração entre 3,95 e 7,38 mm/dia, com 4,39 mm/dia de média. O maior valor encontrado nessa imagem está na área de vegetação rasteira e o menor valor em áreas de solo exposto, contudo a maior média entre os usos do solo foi identificada nas áreas de vegetação arbustiva, com 4,47 mm/dia, com média superior a média de toda a bacia. As áreas de solo exposto e vegetação rasteira apresentaram médias de 4,29 e 4,36 mm/dia, respectivamente, ambas abaixo da média da bacia.

Para a cena de 28/10/2009 (Figura 19b) a evapotranspiração variou entre 1,76 e 3,29 mm/dia, com média para toda a bacia de 1,96 mm/dia, valores bem abaixo dos encontrados para a outra data. Em relação aos usos do solo os valores mais elevados foram encontrados nas áreas de vegetação arbustiva, onde a média da evapotranspiração para esse uso foi de 2,4 mm/dia, seguido das áreas com vegetação rasteira e solo exposto, que apresentaram média de 2 e 2,2 mm/dia, respectivamente.

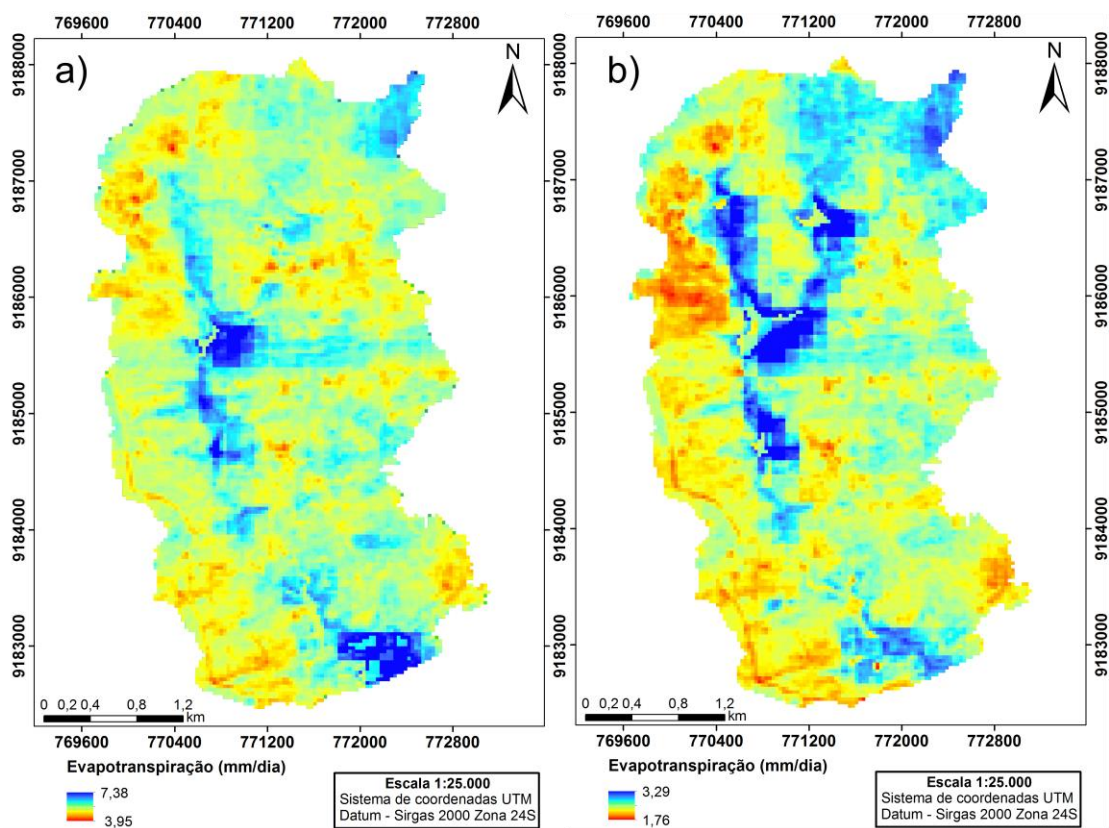


Figura 19. Mapas da evapotranspiração na área de estudo para os dias: (a) 17/12/2004 e (b) 28/10/2009.

Visualmente, pode-se observar que as áreas em azul escuro, onde se localizam os valores mais elevados de evapotranspiração, estão intimamente ligadas as áreas que apresentaram os maiores valores de índice de vegetação, bem como os maiores valores de saldo de radiação, que são nas áreas próximas a rede hidrográfica, onde encontram-se áreas com vegetação de maior porte.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das correlações entre os valores de temperatura de superfície observados e estimados apresentaram bons resultados para as profundidades de 5 e 10 cm.

Os resultados obtidos com os índices de vegetação, temperatura de superfície e saldo de radiação, mostram que as áreas em torno da rede hidrográfica da bacia possuem vegetação mais adensada e com maior quantidade de biomassa, já que as menores temperaturas e os maiores valores de saldo de radiação concentraram-se nessas áreas. Porém, nas áreas onde predominam solo exposto foram encontradas as maiores temperaturas e os valores mais baixos de saldo de radiação. Já os valores medianos encontraram-se principalmente nas áreas de vegetação rasteira. Além disso, os valores encontrados estão de acordo com vários estudos para áreas semiáridas.

A evapotranspiração apresentou uma variabilidade espacial bem definida, pois apesar das influências sazonais, as áreas onde foram obtidos os maiores e menores valores, são praticamente as mesmas nas cenas estudadas.

A determinação da temperatura de superfície, saldo de radiação e evapotranspiração sobre diferentes usos do solo na região semiárida paraibana alcançou valores muito consistentes, mostrando que o algoritmo utilizado é eficiente quando comparado com observações realizadas em campo.

Por fim, pode-se concluir que as técnicas de sensoriamento remoto empregadas, permitiu obter de maneira satisfatória as variações entre os diversos parâmetros, mostrando que o algoritmo SEBAL é uma boa alternativa para o estudo dos componentes do balanço de radiação em áreas mais abrangentes, pois necessita apenas de uma imagem de baixa resolução espacial e alguns dados climatológicos complementares.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land, Advanced training and user's manual**. Idaho: Implementation, 2002, 98p.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, n.2, p. 213-229, 1998
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n.1, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability accross Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, n.2, p.171-192, 2003.
- BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G.; BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. Evaporação e coeficiente de cultura do algodoeiro irrigado a partir de imagens de sensores orbitais. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 64-71, 2012.
- BISHT, G.; BRAS, R.L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 114 p. 1522-1534, 2010.
- BORGES, C.K. **Obtenção da evapotranspiração real diária através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no semiárido brasileiro**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande –PB, 2013.
- BRUTSAERT, W. H.. **Evaporation into the atmosphere**. Boston, Massachusettes: Reidel, 1982. 212 p.
- CHAVES, L.H.G., CHAVES, I.B. E VASCONCELOS, A.C.F. **Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados**. Campina Grande: BNB/UFPB, 54 p. 2002.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.; Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.
- DASH, P.; GOTTSCHKE, F.S.; OLESEM, F.S.H.; FISCHER, H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 2563–2594, 2002.
- DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.12, n.4, p. 385-392, 2008.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento: sem complicação**. Ed. Oficina de Textos- São Pulo. 2008.

FLOREZANO, T. C.. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 2 ed. Oficina de Textos, 2011, 101 p.

GOMES, H.B.; SILVA, B.B.; CAVALCANTI, E.P.; ROCHA, H.R. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GURGEL, H.C.; FERREIRA, N.J.; LUIZ, A.J.B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p. 85-90, 2003.

HUETE, A.R. A soil adjusted vegetation index – SAVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 2, p. 295-309, 1988.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. **Academic Press**, NY, 1983.

MACHADO, C.C.; SILVA, B.B.; DE ALBUQUERQUE, M.B.; GALVINCIO, J.D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n.3, p. 517-523, 1987.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; ANDRÉ, R.G.B.; SILVA, B.B.; FERREIRA, N.J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo SEBAL e imagens MODIS para a região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 85-94, 2012.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012, 266 p.

MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V. P.; GLERIANE, J.M.; ANDRADE, R.G. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 6, p. 491-503, 2009.

OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C.; RUDORFF, B. F. T.. **Balanço de radiação em áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo nas safras 2006/2007 e 2007/2008**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013. V1 . p. 305-312.

PAES-SILVA, A.P. **Cobertura vegetal da bacia hidrográfica do açude Namorado no Cariri paraibano**. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, 2002.

PAIVA, F.M.L.; SRINIVASAN, V.S.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. Estimativa de valores regionais dos parâmetros do solo do modelo Kinneros2 para o semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 141-150, 2011.

PEREIRA, L.C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 36 p.

RODRIGUES, J.O; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, B.B. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 452-465, 2009.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.; SRINIVASAN, V.S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. **OKARA: Geografia em Debate**, v. 1, n. 1, p. 16-32, 2007.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Assessment of land use change on the streamflow using GIS, remote sensing and physically-based model. **IAHS-AISH Publication**, v. 368, p. 38-43, 2014.

SILANS, A.M.B.P.; SILVA, F.M. Fluxo de calor sensível e evapotranspiração na Caatinga: Estudo Experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 177-188, 2007.

SILANS, A. M. B. P.; WERLANG, L.M.; GOLDFARB, M.C. Desenvolvimento de um Modelo SVATS para a Região Semi-Árida do Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 4, p. 5-15, 2008.

SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVA, R.M.; SILVA, L.P.; SANTOS, C.A.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Estimation of evapotranspiration in Brigida river basin (Brazil) by satellite remote sensing. **IAHS-AISH Publication**, v. 344, p. 208-214, 2011.

SILVA, R. M. ; SANTOS, C. A. G.; Análise das perdas de água e solo em um vertissolo cromado sob diferentes sistemas de manejo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, p. 93-107, 2012.

SILVA, A. M.; XAVIER, A.P.C.; MEDEIROS, I. C. ; MARANHÃO, K.U.A.; SILVA, R.M. **Análise multitemporal e atualização do mapa de uso e ocupação do solo do município de Monteiro-PB**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013. v. 16. p. 1548-1555.

SILVA, R.M.; MEDEIROS, I.C. Análise hidrossedimentológica em ambiente SIG usando o modelo SWAT, **GeoFocus**, n. 14 , p. 211-231. 2014.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Ph.D. Thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho. Idaho, 2003.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil, Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 149, n. 4, p. 477-490, 2009a.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil, Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 149, n. 4, p. 462-476, 2009b.

TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and Landsat imagery with the METRIC model. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 5397-5423, 2013.

UDA, P.K.; CORSEUIL, C.W.; KOBİYAMA, M. Mapeamento do saldo de radiação da Bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2013 v. 18, n.2, p. 249-258.

VALERIANO, M.M.; **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o Projeto TOPODATA**. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, INPE, p. 1-8, 2005.

VALERIANO, M.M., ROSSETTI, D.F. e ALBUQUERQUE, P.C.G.; **Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional**, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 1-8, 2009.

XAVIER, A.P.C.; SILVA, A.M.; SILVA, R.M. Mudanças espaço-temporais da variabilidade da precipitação e perdas de solo na Bacia do Rio Mamuaba, Brasil. **Cadernos do Logepa**, v. 8, p. 79-102, 2013.